



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
NÚCLEO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

ISAAC LEAL DE SANTANA

POTENCIAL DE USO DO LODO DE ESGOTO E DE SEU
BIOCARVÃO VISANDO AS PROPRIEDADES FÍSICO-
HÍDRICAS DE UM SOLO CULTIVADO COM CAFÉ
CONILON (*Coffea canephora*)

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

ISAAC LEAL DE SANTANA

POTENCIAL DE USO DO LODO DE ESGOTO E DE SEU
BIOCARVÃO VISANDO AS PROPRIEDADES FÍSICO-
HÍDRICAS DE UM SOLO CULTIVADO COM CAFÉ
CONILON (*Coffea canephora*)

Dissertação apresentado ao Núcleo de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos como um dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Maria Isidória Silva Gonzaga
Co-Orientador: Prof. Dr. André Quintão de Almeida

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

S232p Santana, Isaac Leal de
Potencial de uso do lodo de esgoto e de seu biocarvão visando as propriedades físico-hídricas de um solo cultivado com café Conilon (*Coffea canephora*) / Isaac Leal de Santana ; orientadora Maria Isidória Silva Gonzaga. – São Cristóvão, SE, 2019.
72 f. : il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Recursos hídricos. 2. Lodo residual. 3. Solos – Absorção. 4. Solos – Umidade – Medição. 5. Biocarvão. 6. Café - Cultivo. I. Gonzaga, Maria Isidória Silva, orient. II. Título.

CDU 556.18:628.386

ISAAC LEAL DE SANTANA

POTENCIAL DE USO DO LODO DE ESGOTO E DE SEU BIOCARVÃO VISANDO AS
PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DE UM SOLO CULTIVADO COM CAFÉ
CONILON (*Coffea canephora*)

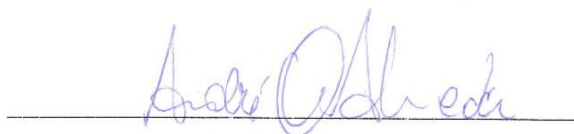
Dissertação apresentado ao Núcleo de Pós-
Graduação em Recursos Hídricos como um dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em
Recursos Hídricos.

APROVADA: 26 de fevereiro, de 2019.

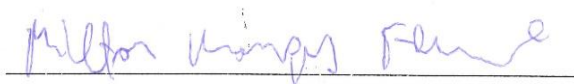


Prof. Dra. Maria Isidória Silva Gonzaga

Orientador



Prof. Dr. André Quintão de Almeida



Prof. Dr. Milton Marques Fernandes

SÃO CRISTÓVÃO – SE

2019

Dedicatória

A minha família, meu pai José Gonzaga, minha mãe Dolores, minha irmã Daysi. Aos amigos, que são muitos, todos que sempre mim apoiaram e mim ajudaram de alguma forma.

Agradecimentos

A Deus, pois sempre mim ilumina para caminhos de alegrias. Meus pais, José Gonzaga e Dolores, minha irmã Daysi, sempre ao meu lado e motivando a chegar a lugares altos. As vezes mesmo já longe de onde se começou vale lembrar de quem ajudou a da os primeiros passos, por isso sou eternamente grato aos amigos em Simão Dias, Diego, Kelvin, Daniel, Gabriel, Ancelmo e tantos outros. A família Viana no todo, André, Aluizio e família, Edilson Viana e família.

Na ufs fiz amigos que levo sempre comigo, a turma do RESUN...que sempre levando a vida de forma humorada.

A turma do LAS (Laboratório de águas e solo), onde cheguei e fui bem recebido por todos e foi a minha segunda casa, a professora e amiga Maria Isidória a qual admiro muito e mim espelho, foi quem sempre me ajudou e me guiou. LAS onde cheguei como um aluno e sai Mestre. Professores que considero como amigos, André Quintão, Thadeu, Inajá. A empresa Consagro, Everton e Juliana, amigos e irmãos. A turma do mestrado, amigos que sofremos e rimos juntos nesses dois anos. A turma do Campus Rural que sempre disposta a ajudar nas atividades em campo. A galera da republica dois anos sobre o mesmo teto vivendo e contando historias

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa e apoio para a pesquisa durante o mestrado. Cada passo dado foi graças a estes e tantos outros, desde o primeiro passo até onde estou hoje, dedico e agradeço a todos... MUITO OBRIGADO...

“Não to mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo; não pasmes, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares. ” Josué 1.9

“A vida me ensinou a nunca desistir, nem ganhar nem perder, mas procurar evoluir”
Dias de luta, dias de glória. Charlie Brown Jr.

RESUMO

A degradação dos recursos naturais, sobretudo solo e água, vem sendo observada há muito tempo, a ponto de ameaçar a sustentabilidade dos ecossistemas. Por isso, medidas que aliviem os impactos ambientais, contribuam para a recuperação de áreas afetadas e melhorem a produtividade agrícola são necessárias e urgentes. Uma das formas de manejo ambiental que vem sendo considerada muito promissora para melhorar a qualidade do solo e proporcionar o uso eficiente dos recursos hídricos em áreas agrícolas é a aplicação de biocarvão de resíduos orgânicos, dentre estes um que vem ganhando destaque é o de lodo de esgoto, em função da grande quantidade produzida nas estações de tratamento e da riqueza em carbono e outros nutrientes como N e P.

O presente estudo foi desenvolvido na estação experimental da UFS, em delineamento de blocos casualizados, com 3 tratamentos (biocarvão de lodo, lodo e controle) e 6 repetições, com o objetivo de avaliar o efeito do biocarvão de lodo de esgoto em parâmetros físico-hídricos de um Argissolo Vermelho amarelo Distrófico típico cultivado com café conilon. Foram determinados a curva de retenção de água, distribuição de poros por tamanho, densidade do solo, resistência mecânica do solo à penetração e intervalo hídrico ótimo. A umidade do solo foi monitorada com a Sonda Diviner. A produtividade do cafezal também foi avaliada.

Os resultados encontrados foram avaliados por meio do programa estatístico SISVAR. A aplicação de lodo de esgoto e de seu biocarvão melhoraram a capacidade de armazenamento de água no solo, a resistência do solo à penetração das raízes, a densidade do solo e a produtividade do café, a qual foi provavelmente beneficiada pelo fornecimento extra de N e P presentes nos resíduos orgânicos. Foi observado um incremento de 73% (Lodo) e 44% (Biocarvão de lodo) na produtividade de grãos em relação ao controle. Houve aumento no intervalo hídrico ótimo, principalmente pela elevação dos valores da capacidade de campo.

O biocarvão de lodo de esgoto mostrou-se eficiente para a melhoria e condicionamento do solo, mesmo em baixa taxa de aplicação, confirmando os resultados amplamente encontrados na literatura sobre os benefícios desse material.

ABSTRACT

Natural resource degradation, especially soil and water, has been observed for a long time, to the point of threatening the sustainability of ecosystems. Therefore, measures that alleviate environmental impacts, contribute to the recovery of affected areas and improve agricultural productivity are necessary and urgent. Application of organic waste in the form of biochar, especially from sewage sludge, has been considered a very promising environmental management to improve soil and water quality in agricultural areas. Sewage sludge is produced in large amount in the waste water treatment plants and is rich in carbon and other nutrients such as N and P.

The present study was carried out in the experimental station of the Federal University of Sergipe, in a randomized block design, with 3 treatments (sewage sludge biochar, uncharred sewage sludge and control) and 6 replications. The objective was to evaluate the effect of the biochar from sewage sludge in some physical properties of a Red Yellow Argisol Typical Dystrophic cultivated with conilon coffee. The water retention curve, pore size distribution, soil density, soil mechanical resistance to penetration and optimal water range were determined. Soil moisture was monitored with the Diviner Probe. The productivity of coffee was also evaluated.

The results were evaluated using the statistical program SISVAR. The application of sewage sludge and its biochar improved soil water storage capacity, soil resistance to root penetration, soil density and coffee productivity, which was probably benefited by the extra supply of N and P present in the organic waste. An increase of 73% (Sludge) and 44% (Sludge Biochar) was observed in grain yield in relation to the control. There was an increase in the optimal water range, mainly due to the increase of the field capacity values.

The sewage sludge biochar was efficient for soil improvement and conditioning, even at low application rate, confirming the results widely found in the literature on the benefits of this material.

Lista de ilustrações

Figura 1 - Tubulação do perfilador de solo – DIVINER 2000, SENTEK.....	14
Figura 2 – kit completo DIVINER 2000, SENTEK.....	15
Figura 3 - Base Shield Arduino para Módulos Grove V2, 3 sensores.....	15
Figura 4- Croqui de linhas de plantio de café, São Cristóvão, SE.....	17
Figura 5 – Amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos, em processo de saturação. São Cristóvão, SE.....	19
Figura 6 – Amostras de solo em funis, após processo de saturação, já em estado de drenagem. São Cristóvão, SE.	21
Figura 7 – Data Logger e Arduino Uno.....	23
Figura 8 – Frutos do cafeeiro na área experimental no dia da colheita. São Cristóvão, SE.....	25
Figura 9 – Parâmetros físico-hídricos (Macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do Argissolo Vermelho amarelo Distrófico típico tratado com lodo de esgoto e bicarvão de lodo, na camada de 0-10 cm, aos 12 (2017) e 24 (2018) meses após a aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	27
Figura 10 – Densidade do solo (Ds) do Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico tratado com lodo de esgoto e bicarvão de lodo, na camada de 0-10 cm, aos 12 (2017) e 24 (2018) meses após a aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	29
Figura 11 – Curva característica de retenção de água no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	33
Figura 12 – Capacidade de de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	34
Figura 13 – Resistência a penetração em laboratório na camada de 0,0-0,10 metros no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	38
Figura 14 – área com passagem de escoamento da água após precipitações.....	39
Figura 15 – Valores médios de resistência mecânica à penetração e de umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE.....	40

Figura 16 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 1.....	41
Figura 17 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 2.....	41
Figura 18 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 3.....	42
Figura 19 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 4.....	43
Figura 20 - Intervalo Hídrico Ótimo do Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico, na camada de 0-10 cm, após tratamento com biocarvão de lodo (A), lodo cru (B) e controle (C). São Cristóvão, SE. CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; PA: porosidade de aeração.....	44
Figura 21 – Capacidade de retenção de água (CRA) no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.....	48
Figura 22 – instalação em campo das sondas feitas com Arduino. São Cristóvão, SE.....	51
Figura 23 – Umidade do solo com a sonda de haste do Arduino (esquerda) e com a sonda DIVINER (direita) na área 2 do café.....	53
Figura 24 – Umidade do solo ao longo do tempo, obtida através da sonda Diviner. A: biocarvão, B: lodo de esgoto, C: controle. Para cada tratamento, são apresentadas 4 repetições. Sendo 4 tubos para cada tratamento, cada tubo para as 4 áreas respectivamente.....	54
Figura 25 – Valores médios de umidade do solo, de evapotranspiração de referência e de precipitação na área experimental. A: 0-0,10 m; B: 0,10-0,20 m; C: 0,20-0,30. São Cristóvão-SE.....	56
Figura 26 – Altura, diâmetro do caule e produtividade das plantas de café conilon na área experimental. São Cristóvão, SE.....	58
Figura 27 – Produtividade do café arábica (T/ha) nos diferentes tratamentos com lodo de ETE caído.....	60
Figura 28 – Presença de macrorganismos no solo com tratamentos, aporte de matéria orgânica pela planta do café.....	62

Sumário

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 – REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1 Evolução da agricultura e demanda de alimentos	4
3.2 A cultura do café Conilon.....	5
3.3 Importância da água na agricultura	6
3.4 Importância do lodo de esgoto na agricultura	7
3.5 Biocarvão de lodo de esgoto e seu efeito nas propriedades físico-hídricas do solo... 9	
3.6 Retenção e armazenamento da água no solo	11
3.7 Monitoramento da umidade do solo	13
3.7.1 Principais sensores de umidade do solo.....	13
a) Sonda de capacitância FDR (diviner 2000).....	13
b) Sensor de umidade eletrônico (arduino uno r3).....	15
4 – MATERIAL E MÉTODOS.....	16
4.1 Caracterização da área de estudo.....	16
4.2 Instalação do experimento.....	17
4.3 Avaliação dos parâmetros físico-hídricos do solo.....	18
4.3.1 Porosidade e densidade do solo	18
4.3.2 Determinação da curva característica de retenção de água no solo.....	18
4.3.3 Determinação da resistência do solo à penetração em laboratório	19
4.3.4 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)	20
4.3.5 Capacidade de retenção de água (CRA) pelo método do funil.....	21
4.3.6 Determinação da umidade do solo através de monitoramento utilizando-se a Sonda Diviner e o sensor Arduino.....	22
4.3.7 Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP).....	24

4.3.8 Avaliação do crescimento, nutrição e produção do café	24
5 – RESULTADO E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Macro, micro, porosidade total e densidade do solo	26
5.2 Curva característica de retenção de água.....	32
5.3 Resistência mecânica do solo á penetração	37
5.4 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	43
5.5 Retenção de água no solo pelo método do funil.....	47
5.6 Umidade do solo ao longo do tempo (ARDUINO UNO E DIVINER 2000)	50
5.7 Avaliação do crescimento e da produtividade do café conilon na área experimental.....	57
5.8 Avaliação visual da biota do solo na área experimental.....	60
6 – CONCLUSÕES	63
7 – REFERÊNCIAS	64

1 – INTRODUÇÃO

A expansão das áreas agrícolas para atender à crescente demanda por alimentos e fibras tem como características principais o uso intensivo do solo e o manejo inadequado, causando a degradação das bacias hidrográficas e a redução na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos. Isso vem acontecendo há várias décadas no Brasil, onde grandes áreas de vegetação nativa foram incluídas no processo produtivo, sob práticas de manejo convencional. Essas áreas apresentam sérias dificuldades para manter a produtividade, principalmente em função dos impactos negativos à estrutura do solo, resultantes da erosão e compactação. A consequência direta de danos à estrutura física do solo é a redução na capacidade de armazenamento de água, um insumo de fundamental importância na produção agrícola.

Essas áreas agora abandonadas ou ainda em uso necessitam de investimentos para recuperação de sua estrutura e retorno ao processo produtivo. A recuperação de solos com problemas de degradação física não é uma tarefa fácil, requer um longo tempo de tratamento e inclui obrigatoriamente práticas de manejo mais conservacionistas e, sobretudo, o manejo de resíduos orgânicos. O grau de dificuldade pode ainda aumentar em regiões onde há baixa precipitação pluviométrica e escassez de água para irrigação, pois o incremento de matéria orgânica e de vegetação na superfície é dificultado. A presença de água é fundamental para as reações químicas, físicas e biológicas do solo e para o desenvolvimento das culturas, que por sua vez irão contribuir com proteção física, aporte de resíduos e reestruturação do solo.

Uma das alternativas para o manejo de resíduos no solo é a aplicação de lodo de esgoto, subproduto do processo de tratamento dos efluentes domésticos. Apesar do potencial de uso em função da grande quantidade de matéria orgânica e nutrientes, há algumas restrições relacionadas à presença de organismos patogênicos que podem causar problema de contaminação da cadeia alimentar, o que pode ser resolvido através da carbonização do material a elevadas temperaturas, podendo variar de 300 a 700 °C, antes da aplicação no solo. Esse processo resulta no biocarvão, cujas características se assemelham à matéria prima original, mas com a vantagem de ser livre de patógenos.

O lodo é considerado um bom condicionador do solo, pois melhora o estado de agregação, a densidade e a porosidade, e aumenta a capacidade de retenção de água. A transformação do lodo em biocarvão intensifica essas propriedades e elimina os patógenos, reduzindo as restrições de uso, podendo ser empregado até mesmo em culturas como hortaliças. A tecnologia biocarvão vai além dos benefícios nas propriedades físicas do solo, uma vez que viabiliza o uso do lodo de esgoto no solo e reduz os problemas com o seu

descarte, considerado um grande desafio para as estações de tratamento. A grande maioria das pesquisas sobre o biocarvão e lodo de esgoto é realizada em laboratórios, casa de vegetação, porém, ainda existe pouca informação a respeito dos efeitos em longo prazo dessa prática, principalmente em condições reais de campo.

Alguns estudos realizados em condições de casa de vegetação e laboratório, na Universidade Federal de Sergipe, mostraram que o biocarvão de lodo possui potencial para recuperar solos contaminados com metais pesados, pois favoreceu o desenvolvimento de plantas e estimulou a atividade microbiana, porém nenhum estudo foi realizado para avaliar as propriedades físicas do solo, sobretudo aquelas relacionadas à retenção de água, uma das grandes restrições encontradas nos solos arenosos do estado de Sergipe. Solos arenosos são os mais beneficiados pela presença de biocarvão, principalmente em retenção de água, pois aumenta a proporção de microporos.

A aplicação de biocarvão em solo sob cultivo de café visou proporcionar um melhor ambiente edáfico para essa cultura, principalmente por ser uma inovação no estado de Sergipe. A cultura apresenta elevada demanda hídrica e responde ao estresse através de baixo crescimento vegetativo, baixa qualidade do grão ao final e baixa produtividade. Portanto, a presença de biocarvão pode aumentar a retenção de água no solo e favorecer o desenvolvimento da planta.

2 – OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de uso do biocarvão de lodo de esgoto como condicionador nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado com café Conilon no estado de Sergipe.

2.2 Objetivos específicos

1. Determinar a distribuição de poros por tamanho e a densidade do solo;
2. Determinar a curva característica de retenção de água no solo;
3. Determinar a influência do biocarvão e do lodo no intervalo hídrico ótimo do Argissolo;
4. Avaliar a capacidade de retenção de água no solo usando um método alternativo do UF-IFAS Extension Group.
5. Monitorar a umidade do solo usando a sonda Diviner e o sensor arduino;
6. Avaliar se os biocondicionadores influenciam no crescimento da planta e a produtividade de grãos de café

3 – REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Evolução da agricultura e demanda de alimentos

A agricultura começou com a fixação do homem em áreas que se tornam parte do processo de produção agrícola. Com o passar dos séculos, mais e mais áreas foram somadas para este fim (ULYETT et al., 2014). A população vem aumentando e com ela aumenta também demanda pelos recursos naturais. A demanda por maiores safras é uma questão global urgente. As taxas de crescimento da produção agrícola mundial, superadas pelos incrementos populacionais nos últimos anos, vem causando certa intranquilidade com relação à segurança alimentar (PAZ; FRANCO; MENDONÇA, 2000). O crescimento da área agricultável frequentemente ocorre em áreas de reserva e preservação, onde a derrubada e queima da mata ocasiona a perda natural da fertilidade do solo, diminuindo a matéria orgânica do solo e liberação de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (PETTER et al., 2016).

Tendo em vista uma população de 9 bilhões de pessoas em 2050, a ONU tem projetado a necessidade de dobrar a produção global de alimentos para acompanhar a crescente demanda impulsionada pela população e pelo crescimento econômico (BASSO et al., 2013). No entanto, a sustentabilidade dos recursos de terra e água, responsável pela segurança alimentar, requer uma vigilância contínua, compatibilizando informações e procedimentos de controle da disponibilidade e qualidade desses recursos (PAZ; FRANCO; MENDONÇA, 2000).

Há ainda que se considerar as mudanças climáticas como um fenômeno que tornará ainda mais difícil a meta da ONU, pois geram mudanças no padrão das precipitações e reduzem a quantidade de áreas potencialmente produtivas. Sendo assim, as práticas de manejo e conservação de água são vitais para otimizar a produção de culturas e manter baixos os custos de produção de alimentos (YU et al., 2017). Esse risco de degradação se torna maior em solos naturalmente susceptíveis à erosão, como é o caso dos solos dos tabuleiros costeiros, solos arenosos, que necessitam de cuidados para a manutenção de sua capacidade agrícola, e a adição de um condicionante, como o biocarvão, ajuda a melhorar as propriedades físicas destes solos, e em regiões mais áridas reter a água por um maior período para as plantas, tanto para o setor agrícola com as áreas em recuperação.

O aumento da capacidade de retenção de água nos solos arenosos ajudará a melhorar a eficiência do uso da água na produção agrícola e pode ser fundamental para fornecer energia e alimentos suficientes para uma população global crescente (BASSO et al., 2013).

3.2 A cultura do café Conilon

O café é um dos produtos de grande destaque na economia brasileira. A safra brasileira dos Cafés do Brasil atingiu em 2017 um volume total equivalente a 44,97 milhões de sacas de 60 kg, o que representa uma redução de 12,5% em relação à safra anterior (EMBRAPA, 2018 B), sendo uma cultura que já está presente em nosso país há mais de 100 anos. No Brasil, a quase totalidade das lavouras de café, genericamente conhecidas por robusta, é do cultivar Conilon (*Coffea canephora*) (MARTINS et al., 2006). Minas Gerais participou com 54,3% da produção nacional de café, Espírito Santo com 19,7%, São Paulo - 9,8%, Bahia - 7,5%, Rondônia - 4,3% e Paraná com 2,7% (EMBRAPA, 2018 B).

Entre os estados produtores, o único nordestino que contribui significativamente é a Bahia. O estado de Sergipe é o único que não produz a cultura, porém tem até hoje as marcas do passado glorioso da cultura em alguns municípios sergipanos, a exemplo do município de Simão Dias, que tem em sua bandeira e brasão municipal um ramo de café com seus frutos, uma lembrança da força econômica que tinha essa cultura na época de sua emancipação política.

Segundo Martins et al. (2006), a cafeicultura no Brasil desenvolveu-se, inicialmente, nas regiões onde não ocorre deficiência hídrica, porém é possível produzir com irrigação, sendo que o cultivar Conilon apresenta plantas de grande porte, grande número de hastes, seu sistema radicular é volumoso e permite maior área para absorção de nutrientes e água. Assim, a cultura pode ser cultivada em solos menos férteis e em regiões com baixa precipitação pluviométrica. Isso porque o adequado manejo de irrigação permite a produção de sementes de qualidade, proporcionando maior rendimento por planta.

O uso de irrigação vem ganhando espaço no Brasil, isso pois possibilita uma produção ao longo do ano, controle produtivo de suas áreas e evita perdas de produção quando ocorrem períodos de estiagem prolongados. Em sistemas eficientes de manejo de água é observado a condição de umidade de solo, o volume de água presente no solo que é necessário para o pleno desenvolvimento da cultura e quando este limite de volume mínimo é alcançado, o sistema é ligado. Diversos estudos e observações, principalmente direcionados à difusão de tecnologia entre produtores, trazem como resultado final a comparação entre a

produtividade de cafeeiros irrigados versus não-irrigados (MARTINS et al., 2007). No entanto, não há uma homogeneidade em relação ao acesso dos produtores à utilização de tecnologias que promovam uma maior produtividade das lavouras, impondo a necessidade de identificação de práticas que proporcionem um menor custo de produção (COSTA et al., 2018).

O diâmetro do caule é fator muito utilizado para avaliação da qualidade de mudas, pois consegue estimar o desenvolvimento da planta e a capacidade de estabelecimento em campo. Segundo Paiva et. al. (2003), o crescimento se dá pela atividade cambial que, por sua vez, é estimulada por carboidratos produzidos na fotossíntese e hormônios translocados das regiões apicais, sendo um indicador prático da assimilação líquida, já que depende mais diretamente da fotossíntese.

A exigência do cafeeiro em umidade do solo é bastante variável, de acordo com as fases do ciclo da planta (MARTINS et al., 2007). Portanto, a quantificação da resposta do cafeeiro à disponibilidade de água é um importante fator na estimativa da produção e na análise da viabilidade da irrigação (ARRUDA et al., 2003). Isso porque o cafeeiro é afetado pela seca com a consequente redução da produção. Para reduzir os danos causados pelo estresse hídrico, a utilização de práticas de conservação da umidade do solo ou de irrigação pode ser uma forma de mitigar os problemas de deficiência hídrica e de aumentar a produção (ARRUDA; GRANDE, 2003).

3.3 Importância da água na agricultura

A água é o bem natural de grande importância para a vida na terra e sua presença geralmente está associada ao desenvolvimento. No universo, a água é o recurso mais importante em todos os aspectos da vida; em excesso, ela causa inundações e calamidades ambientais e sua escassez provoca fome e miséria (PAZ; FRANCO; MENDONÇA, 2000). Porém, o crescimento populacional de forma exponencial e o desenvolvimento econômico têm aumentado a pressão sobre os recursos hídricos. Por essa razão, faz-se necessário o manejo sustentável das bacias hidrográficas bem como a recuperação de áreas degradadas.

Os recursos hídricos destinados ao uso agrícola compreendem quase 70% da demanda mundial (BASSO et al., 2013, FAO, 2002; ONU, 2018) e chegam a suprir 40% da produção mundial, participando em menos de 20% das terras cultivadas (UNESCO, 2012). Também foi estimado que 1,2 bilhão de empregos, ou 36% do total da força de trabalho mundial, são moderadamente dependentes dos recursos hídricos (AGENCIA BRASIL, 2017). O manejo

adequado da água pode conduzir a excelentes resultados na produção de alimentos, porém seu uso inadequado provoca degeneração do meio físico natural (PAZ; FRANCO; MENDONÇA, 2000).

Em lavouras irrigadas, o consumo de água está relacionado ao tipo e eficiência do sistema de irrigação utilizado, o manejo adotado para reposição da evapotranspiração da cultura, dependendo ainda das características da cultura e do sistema de cultivo adotado (SCALCO et al., 2007). Sabe-se que, na maioria dos países e dentro da comunidade tecnológica, as melhores práticas de irrigação são aquelas que buscam o uso mais eficiente da água, com base no uso consultivo das culturas com programação da irrigação, evitando a salinização e a erosão dos solos (PAZ; FRANCO; MENDONÇA, 2000).

3.4 Importância do lodo de esgoto na agricultura

A importância para o Brasil do lodo gerado pelo tratamento de esgoto deve-se às suas possibilidades de uso na agricultura, silvicultura, em substratos para produção de mudas e na recuperação de áreas degradadas. No entanto, há uma grande discrepância na adoção de tecnologias que promovam maior produtividade das lavouras, havendo necessidade de identificação de técnicas que proporcionem um menor custo de produção e um maior retorno econômico para os agricultores (COSTA et al., 2018).

Segundo SOUSA (2015), embora a utilização do LE seja viável na agricultura, principalmente como fonte de nitrogênio e fósforo, a legislação brasileira através da resolução CONAMA 375 de 2006 limita sua utilização, por possuir componentes tóxicos, como os metais pesados e coliformes fecais. O mesmo autor fala que uma alternativa para atender às exigências da legislação é transformar o lodo em biocarvão, identificado internacionalmente por biochar. O biocarvão pode ser produzido de qualquer matéria prima vinda de resíduos, resto de podas, restos de origem orgânica em geral, como o lodo de esgoto.

Produzir biochar de lodo de esgoto pode viabilizar a utilização desse resíduo na agricultura, representando uma excelente alternativa para resolver o problema ambiental gerado pelo acúmulo de lodo nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Biocarvão pode ser produzido de qualquer material orgânico, aparas de árvores e jardins, resíduos de cana-de-açúcar, até mesmo os antes improváveis como lodo de esgoto, tendo que aceitar as especificações de contaminantes.

Para ser usado na agricultura, o lodo deve ser proveniente de estações que recebem apenas esgoto doméstico, por possuir baixa carga de metais pesados. As estações de

tratamento de efluentes domésticos geram um subproduto conhecido como lodo de esgoto (LE), cuja composição compreende 70% de materiais orgânicos e 30% de inorgânicos (USMAN et al, 2012). O biochar de LE, além de rico em matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio e fósforo, aumenta a eficiência dos fertilizantes através das melhorias das propriedades químicas do solo (SOUSA, 2015).

A elevada carga orgânica do lodo pode trazer importantes benefícios ao solo uma vez que melhora a estrutura e a atividade microbiana, mas contém organismos patogênicos que podem causar sérios problemas à saúde humana e de animais, e por essa razão, a utilização agrícola do lodo é permitida após algum tratamento, como a secagem e a calagem, mas ainda assim, com restrições.

Já a parte mineral do lodo é rica em nutrientes prontamente disponíveis como N, P e micronutrientes (KIRCHMANN et al., 2017), mas pode conter também elevada concentração de metais pesados que causam toxicidade às plantas e aos animais. A carga orgânica patogênica e a presença de metais pesados no lodo de esgoto podem causar impactos relevantes nos recursos hídricos, sendo necessário manejo adequado para a sua aplicação no solo.

Embora sejam conhecidas as qualidades agronômicas do LE, que é rico em matéria orgânica e nutrientes, a sua utilização ainda é limitada pela legislação. A transformação desse produto em biochar pode viabilizar a utilização do LE e contornar as limitações estabelecidas (SOUSA, 2015).

O lodo de esgoto já é usado como insumo agrícola em muitos países, inclusive na região sudeste do Brasil. Muitas pesquisas têm sido realizadas sobre os efeitos desse material no solo, com foco principalmente na sua utilização como fonte de nutrientes e como condicionador de solo em áreas degradadas em processo de recuperação. Martinez et al. (2015) aplicaram lodo de esgoto no solo e observaram melhorias significativas na densidade, porosidade e capacidade de retenção de água. Já Martins et al. (2015) e Kitamura et al. (2008) reafirmam a reconhecida importância da utilização do biossólido na agricultura, como adubo orgânico, e como uma das alternativas mais promissoras para disposição final deste resíduo.

Os lodos de esgotos são, de uma maneira geral, fertilizantes nitrogenados. Além do N, o lodo de esgoto contém P e micronutrientes essenciais como Fe, Cu, Mn e Zn. Normalmente, a concentração de K é baixa para suprir as necessidades das culturas agrícolas (LOBO et al., 2013). Um dos fatores que tornam a produção mais onerosa são os fertilizantes químicos, que além de caros, podem causar danos ambientais caso sejam utilizados sem os devidos critérios técnicos. (COSTA et al., 2018).

O manejo adequado do lodo para uso agrícola inclui tratamento prévio, análise de caracterização e recomendação de dose adequada para cada área. Dessa forma, evita-se problemas de contaminação e reduz-se os custos com adubação convencional. Isso é devido à presença de macro e nutrientes, o que reduz a utilização de fertilizantes. Além disso, o lodo é fonte de matéria orgânica, que influencia de forma positiva os parâmetros físicos do solo.

Assim, a utilização do biossólido (como também é conhecido o lodo de esgoto) como adubo orgânico possui caráter duplo em questões de beneficiamento ambiental, sendo o primeiro decorrente do uso de um material considerado nocivo ao meio ambiente e que, em sua grande maioria, não possui uma destinação final adequada e, o segundo, o potencial nutritivo que o mesmo apresenta, sendo possível contribuir de forma positiva nos fatores relacionados à produtividade em diversas culturas (MARTINS et al., 2015).

As contribuições da matéria orgânica presente no lodo de esgoto podem ser diretas, em razão das cargas dependentes do pH e da área superficial específica, e indiretas, atuando na agregação das partículas do solo e melhorando a estrutura (KLEIN; KLEIN, 2015). Há relatos de que a matéria orgânica pode reter até vinte vezes a sua massa em água, sendo parte retida na estrutura interna, com baixa disponibilidade às plantas.

Apesar de seu potencial de uso, há ainda carência de estudos no Brasil que relacionam a utilização de biochar de LE com o desempenho agrônomo de plantas e sua contribuição na fertilidade do solo. Estudos em outros países vêm mostrando a viabilidade de utilização deste produto na agricultura (SOUSA, 2015).

3.5 Biocarvão de lodo de esgoto e seu efeito nas propriedades físico-hídricas do solo

Uma das formas de tratamento mais promissoras para o efetivo aproveitamento do lodo de esgoto como insumo e condicionador em solos agrícolas é a sua transformação termoquímica (GWENZI et al., 2016), um processo que ocorre sob baixa concentração de oxigênio e a elevadas temperaturas, através da pirólise (LEHMANN et al., 2015). Isso possibilita a esterilização do lodo e a eliminação da carga patogênica, viabilizando seu uso no solo. Além disso, a decomposição termoquímica pela qual passa o material durante a pirólise converte os compostos orgânicos presentes em formas aromáticas e de difícil degradação, o que aumenta o tempo de permanência do lodo no solo e reduz as formas disponíveis dos metais pesados, diminuindo os riscos de contaminação (KLEIN; KLEIN, 2015).

Essas transformações da matéria prima durante a pirólise também provocam modificações em sua estrutura, com aumento de porosidade e da superfície específica, com consequente aumento na capacidade de retenção de água, o que pode ser de suma importância em solos de textura arenosa (LEHMANN et al., 2015). Embora a prática do uso do carvão vegetal no solo visando à melhoria do desenvolvimento das plantas seja milenar, pouco se sabe sobre os efeitos técnicos de sua aplicação, sobretudo em longo prazo.

Abel et al. (2013), reportam que, ao adicionar biocarvão ao solo, nas taxas de 1 a 5%, observaram diminuição na densidade do solo, aumento do volume de poros, bem como do conteúdo de água no ponto de murcha permanente. Segundo Klein e Klein (2015), o efeito do biocarvão no solo pode também ser indireto através do estímulo ao crescimento de fungos, sobretudo os micorrízicos, muito importantes por melhorarem as interações planta-água, aumentando a resistência à seca. Esses fungos atuam na agregação do solo, melhoram a estrutura e auxiliam as raízes na absorção de água. Ótimos níveis de agregação oferecem proteção física da matéria orgânica e também influenciam diretamente na movimentação e retenção de água no solo Klein e Klein (2015).

O biocarvão contém propriedades únicas que fazem dele não somente um produto sustentavelmente benéfico à produtividade e qualidade biológica do solo, mas também é uma ferramenta apropriada para sequestro de dióxido de carbono da atmosfera no solo por períodos longos em uma tentativa de mitigar o aquecimento global (LOPES, 2014). O biochar tem o potencial de alterar a hidrologia do solo e impulsionar mudanças na quantidade de água armazenada nos solos (HERATH; CAMPS-ARBESTIAN; HEDLEY, 2013). Em relação a outros indicadores de qualidade do solo, a utilização do biochar mostrou-se eficaz quanto à preferência das minhocas e viabilidade na fixação biológica do nitrogênio (SOUZA et al., 2015).

Os estudos de Ulyett (2014) realçam o efeito do biocarvão tanto em solos arenosos como em argilosos, reduzindo a densidade e aumentando a retenção de água do solo, o que pode ser explicado pela natureza porosa do biocarvão. Da mesma forma, Sum e Lu (2014) aplicaram biocarvão de chips de madeira, palhas de culturas e de lodo de esgoto em um solo argiloso, na China, e observaram aumentos na agregação e na retenção de água do solo, sobretudo no tratamento com biocarvão de lodo.

Segundo ABEL et al. (2013), embora haja uma extensa pesquisa feita sobre os efeitos do biocarvão sobre as propriedades químicas dos solos, estudos que contribuam com informações sobre o efeito do biochar em propriedades físico-hídricas dos solos são raros, sobretudo aqueles realizados em campo, mais difíceis de serem encontrados, pois a maioria

das pesquisas ocorre com a coleta e os solos são trabalhados em laboratório. Segundo YU et al. (2017), cada tipo de matéria prima para o biocarvão pode conter composição diferente.

Por isso, alguns biocarvões podem ser mais adequados para diferentes tipos de culturas. Existe grande variabilidade entre os biocarvões no que concerne a características como concentração de nutrientes, porosidade, superfície específica e pH. Pesquisas nesta área podem fornecer uma gama de informações aos produtores na hora de decidir qual e quanto aplicar em sua propriedade. Esta informação poderia permitir melhores práticas de irrigação e fertilizantes entre os agricultores e outros interessados na melhoria do solo agrícola (YU et al., 2017). Segundo Liu et al., (2017), para entender as alterações provocadas pelo biochar no fornecimento de água às plantas, é necessário entender como ele afeta os processos hidrológicos do solo.

3.6 Retenção e armazenamento da água no solo

A capacidade de retenção de água no solo é uma propriedade importante para o desenvolvimento das plantas, pois está relacionada à absorção de água e nutrientes (YU et al., 2017). Recentemente, pesquisadores descobriram que as adições de biochar tem o potencial de aumentar a capacidade de retenção de água no solo, reduzindo a quantidade de água de irrigação necessária para cultivo nessas regiões (BASSO et al., 2013). A retenção e disponibilidade de água às plantas é um tema tão valioso que existe no Brasil uma política pública para gerir os cultivos agrícolas (especialmente os passíveis de financiamento).

O Zoneamento Agrícola de Risco Climático considera como premissa a semeadura, o clima da região, o ciclo dos cultivares, e o tipo de solo (textura, profundidade), e através deste, estima-se o volume passível de armazenamento e posterior disponibilidade (KLEIN; KLEIN, 2015). A gravidade dos problemas associados a retenção de água e a lixiviação de nutrientes depende da região e do tipo de solo (YU et al., 2017). Isso mostra a importância do solo e de seu manejo para a agricultura, evitando risco de perdas, degradação e pressão agrícola para determinadas áreas.

O armazenamento de água no solo varia em função da quantidade de água que infiltra e dos fatores que contribuem para que esta permaneça armazenada ao alcance do sistema radicular, o que é influenciado pelas propriedades físicas, mecânicas e hídricas do solo e por fatores locais, como a percentagem de cobertura da vegetação do solo (SERAFIM et al.,

2013). A adição de matéria orgânica, por exemplo, auxilia nas propriedades físico hídricas do solo, aumenta a retenção de água, melhora a estrutura, a agregação e a distribuição do espaço poroso. Com isso, há melhorias significativas no desenvolvimento radicular, que, ao percorrer maiores volumes de solo, tem maior acesso à água disponível (KLEIN; KLEIN, 2015).

Blainski et al. (2009) reportam que o manejo de irrigação tem baseando-se no controle do potencial da água no solo como fator limitante do crescimento das plantas, e reforçam sobre a importância de inclusão de outros parâmetros ao dizer que outras variáveis podem influenciar a cultura, mesmo que o potencial de água no solo não seja limitante. Assim, deve existir uma faixa de água disponível no solo caracterizada como intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse parâmetro integra, numa só medida, os efeitos do potencial da água no solo, da resistência mecânica à penetração das raízes e da porosidade do solo adequada à difusão de oxigênio às raízes (TORMENA et al., 2007). Em solos com estrutura preservada, o intervalo hídrico ótimo em que as condições físicas são adequadas para as plantas é igual à água disponível, que ocorre entre a capacidade de campo (CC - limite superior) e o ponto de murcha permanente (PMP - limite inferior) do solo.

Para a determinação do IHO, alguns padrões são estabelecidos em parâmetros físicos do solo considerados adequados para o crescimento de plantas, como porosidade de aeração acima de 10%, resistência do solo à penetração inferior a 2 MPa (2000 kPa). O IHO pode ter como limite superior o teor de água no solo na condição de capacidade de campo (θ_{CC}) ou o teor de água em que a porosidade de aeração se encontra no valor de 10 % (θ_{PA}); como limite inferior, pode-se ter o teor de água do solo na condição de ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou teor de água em que a resistência do solo à penetração seja igual a 2,0 MPa (θ_{RP}) (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). O IHO vem ganhando espaço por avaliar diversos fatores, tornando possível chegar mais perto possível dos valores reais de campo.

A diminuição desses parâmetros demonstra haver maior restrição à cultura. O movimento e armazenamento de água nos solos são cruciais para o fornecimento de nutrientes e a produtividade das plantas (LIU et al., 2017). No caso de compactação do solo, a capacidade de enraizamento é comprometida, a infiltração fica prejudicada e ocorre rápido secamento do solo, induzindo à baixa disponibilização de nutrientes às plantas. O alto grau de restrição ao desenvolvimento das plantas dificulta o desenvolvimento das culturas, maior necessidade de mão de obra, dispêndio de tempo, havendo maior gasto de água para suprir a necessidade, e desperdício devido ao escoamento superficial, levando consigo nutrientes e partículas de solo, agregando cada vez mais valor à sua implantação e manutenção.

3.7 Monitoramento da umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo é de suma importância para o manejo correto da irrigação, podendo ser realizado através de equipamentos de alto custo, mais precisos, com maior rapidez, porém, a utilização de equipamentos de baixo custo é imprescindível em pequenas propriedades. O acompanhamento da umidade do solo é fator primordial ao eficiente uso da água na irrigação, sendo observado como o solo está em sua capacidade de fornecer água às plantas. A tecnologia tem estado sempre presente na tomada de decisão em todos os ramos da agricultura, tanto em grandes propriedades a custos elevados, quanto em pequenas áreas a baixo custo.

Existem métodos diretos e indiretos para quantificar a umidade do solo. No método direto, as amostras de solo são coletadas diretamente no campo e o conteúdo de água disponível no solo é estimado pela relação entre o peso úmido e seco da amostra, a exemplo do gravimétrico, considerado como o método direto padrão. Os métodos indiretos são aqueles que estimam o teor de água no solo a partir de propriedades físicas do solo, como a termalização de neutros, resistência elétrica, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a frequência no domínio do tempo (FDR) (SOUZA; MATSURA, 2002). Apesar de mais precisos, os métodos diretos são mais trabalhosos, demandam mais tempo e são passíveis de erros durante a retirada de amostras no campo. Sendo, portanto, vantajoso o uso de técnicas indiretas de medição de conteúdo de água no solo.

O uso de métodos indiretos tem aumentado nos últimos tempos, impulsionado pelo fácil manuseio, segurança e conforto ao operador, coleta e armazenamento automático dos dados em diferentes perfis do solo, além de ser uma técnica não destrutiva do solo. Os métodos indiretos podem fazer leituras sem necessidade de grande ação antrópica e não afetam o sistema radicular da cultura. Entretanto, equações de calibração devem ser ajustadas para cada tipo de solo.

3.7.1 Principais sensores de umidade do solo

a) Sonda de capacitância FDR (diviner 2000)

Dentre os métodos indiretos, se destaca a sonda de capacitância, mais precisamente o equipamento Diviner 2000, da Sentek. O método baseia-se na medição da constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo), a qual é relacionada com a umidade volumétrica (SILVA, 2006). O equipamento tem uma calibração universal, porém é necessária uma calibração no solo trabalhado para dados mais precisos, pois as leituras podem

ter variação devido a propriedades físicas do solo, como textura e densidade, pois exercem grande influência na retenção de água no solo, ou propriedades químicas, como por exemplo, o teor de óxido de ferro, o qual altera a constante dielétrica, gerando erro na umidade estimada.

Recentemente, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de ajustar equações de calibração de sondas capacitivas (SILVA et al., 2013). Nesse método, são inicialmente instalados tubos com aproximadamente 0,70 m de profundidade e as leituras da umidade do solo são realizadas pelo perfilador (Figuras 1 e 2).



Figura 1. Tubulação do perfilador de solo – DIVINER 2000, SENTEK.



Figura 2 – kit completo DIVINER 2000, SENTEK.

Fonte: http://www.fondriest.com/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/s/e/sentek_00007_lg.jpg

b) Sensor de umidade eletrônico (arduino uno r3)

O Arduino é uma plataforma de criação de protótipos eletrônicos, sendo hardware livre, permitindo criação de simples projetos eletrônicos (Figura 3). Sua utilização permite a associação com diversos tipos periféricos, como displays, botões, sensores, módulos Ethernet, entre outros, é então bastante comum em projetos que desejam manter o baixo custo (MELLO et al., 2017). Este seria um sensor de aproximadamente 0,10 m no solo em estudo, tendo duas hastes e mede a corrente que atravessa de uma para outra, usando a água presente como condutor.

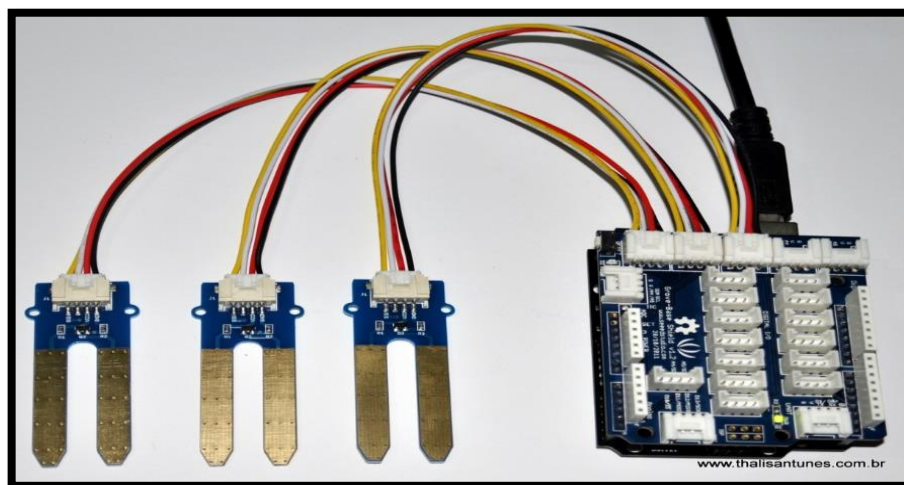


Figura 3 - Base Shield Arduino para Módulos Grove V2, 3 sensores. Fonte: www.thalisantunes.com.br

4 – MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na estação experimental da Universidade Federal de Sergipe, localizada no município de São Cristóvão – SE, cujas coordenadas geográficas aproximadas são: 10°55'29'' de latitude sul e 37°11'58'' de longitude oeste. O clima, de acordo com a classificação de Thornthwaite, é do tipo C_{2s}A'a', ou seja, subúmido com déficit de água no verão, o período chuvoso ocorre entre os meses de abril e agosto, a temperatura média na região é de 24,85 °C e a precipitação média anual é de 1576,30 mm. O solo é classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, segundo EMBRAPA (2007), e suas principais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos do Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico típico utilizado no estudo, São Cristóvão, SE.

Atributo do solo	Unidade	Valor
Areia	%	80,0
Silte	%	11,30
Argila	%	8,66
Classe textural		Areia Franca
pH		6,8
Matéria orgânica	g dm ⁻³	8,71
P	mg dm ⁻³	5,40
K	mg dm ⁻³	22,1
Ca	cmolc dm ⁻³	0,58

A área escolhida para o estudo compreende um plantio de café conilon, variedade Vitória, em consórcio com bananeira. O plantio de café (*Coffea robusta*) foi realizado em maio de 2016, com espaçamento de 3 m entre linhas e 1 m entre plantas. As linhas de plantio de café estão intercaladas com linhas de plantio da cultura da banana, em espaçamento 1 x 3, já existente para fins de sombreamento (Figura 4).

Foram feitas adubações de plantio e de condução utilizando-se como fonte de N P K o fertilizante, na dose de 15 g de N/planta e 20g de K₂O/planta no plantio e 200 Kg/ha/ano de N e 170 kg/ha/ano de K₂O na condução. A limpeza da foi era feita periodicamente, quando necessário e de forma manual.



Figura 4. Croqui de linhas de plantio de café, São Cristóvão, SE.

4.2 Instalação do experimento

O lodo de esgoto foi coletado em leitos de secagem na estação de tratamento de esgoto da Companhia de Saneamento (DESO), localizada no bairro Orlando Dantas, na Grande Aracajú, SE. Após secagem adicional, o lodo foi transferido para a câmara de pirólise. O biocarvão de lodo foi produzido em um forno artesanal adaptado, utilizando um modelo desenvolvido pela IBI (Iniciativa Internacional do Biocarvão), o TLUD (Top Lid Up Draft). Antes da aplicação, o biocarvão foi moído e passado em peneira a 2 mm.

O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados, com 3 tratamentos: 1. Biocarvão de lodo de esgoto (BLE); 2. Lodo de esgoto sem carbonizar (LE) e 3. Controle, sem adição de nenhum resíduo, e seis repetições. Os resíduos foram adicionados na dose de 20 t ha⁻¹, nas linhas de plantio do café, em faixas contínuas de 1 metro de largura e incorporados na camada de 0-10 cm, em setembro de 2016, 4 meses após o plantio das mudas de café. A irrigação é feita por gotejamento.

4.3 Avaliação dos parâmetros físico-hídricos do solo

4.3.1 Porosidade e densidade do solo

Amostras indeformadas foram coletadas passado um ano a adição dos condicionadores, 2017, e uma segunda coleta após um ano, 2018, feitas com o auxílio do amostrador de Uhland, saturadas com água destilada durante 24 h, pesadas (solo saturado) e levadas à mesa de tensão sob uma tensão de -6 kPa. Após atingirem o equilíbrio, as amostras eram novamente pesadas (macroporosidade) e levadas à estufa para secar a 105° C (microporosidade). A densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa do solo seco à 105°C e o volume total do solo (volume do anel) (EMBRAPA, 1997). As amostras para macro e microporosidade foram retiradas em dois períodos, no segundo semestre de 2017, amostras essas que foram usadas para determinar parâmetros como IHO; e no segundo semestre de 2018.

4.3.2 Determinação da curva característica de retenção de água no solo

As amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis volumétricos com dimensões de 2 cm de altura e 5,2 cm de diâmetro (Figura 5), no centro da faixa dos tratamentos, com auxílio de trado tipo Uhland, nas camadas de 0-0,10 cm e 0,10-0,20m, acondicionadas em papel alumínio e transportadas para o laboratório, onde foram preparadas e submetidas para a determinação dos parâmetros físico hídricos.

Após saturação, as amostras foram submetidas aos seguintes potenciais: 0, -6, -10 kPa, utilizando uma mesa de tensão, e os potenciais -33, -100, -500 e -1500 kPa por meio de pressões aplicadas em placas porosas dentro de câmara de pressão de Richards. Após o equilíbrio em cada potencial aplicado, as amostras eram pesadas e submetidas ao teste de resistência à penetração em um penetrômetro de bancada (que será descrito posteriormente), e posteriormente levadas para secagem em estufa à temperatura de 105–110 °C, durante 24 horas. As amostras foram novamente pesadas para determinação da umidade através da equação:

$$U_g = (\text{Solo úmido (g)} - \text{Solo seco (g)} / \text{solo seco (g)}) \times 100$$

$$U_v = U_g \times D_s;$$

Onde:

U_g : umidade gravimétrica (%)

U_v : Umidade volumétrica (%)

D_s : Densidade do solo

Após a obtenção dos valores de umidade em cada potencial aplicado, os resultados foram utilizados para confeccionar a curva característica de retenção de água no solo. O ajuste das curvas foi feito de acordo com a equação de Van Genuchten (1980), utilizando o programa CURVARET versão 2.16 (Departamento de Agricultura – ESALQ), e plotados em função das tensões de sucção aplicadas.

Para determinação da disponibilidade de água (AD) no solo, foi considerado a capacidade de campo (CC) como a umidade do solo obtida com a aplicação da tensão de -10 kPa e como ponto de murcha permanente (PMP), a tensão obtida em -1500 kPa, conforme equação:

$$AD = CC - PMP$$



Figura 5. – Amostras indeformadas de solo em anéis volumétricos, em processo de saturação. São Cristóvão, SE.

4.3.3 Determinação da resistência do solo à penetração em laboratório

Após o equilíbrio das amostras de solo para cada tensão matricial, 0, 6, 10, 33, 100, 500 e 1500 Kpa, as amostras foram levadas para análise de resistência à penetração em Laboratório (RPL), utilizando um penetrógrafo de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, equipado com célula de carga contendo haste com cone de 4 mm de diâmetro e ângulo de 45°.

Para o cálculo da resistência à penetração, de cada ensaio, foram considerados os dados de força de penetração obtidos mais próximos ao centro das amostras, buscando uma real leitura de resistência, sendo que a cada segundo o equipamento registra e armazena os

dados, por meio de software próprio e PC, um dado de força de penetração (kgf) a cada segundo. A resistência à penetração em laboratório foi calculada conforme equação:

$$RPL = (FP/0,1275) * 98,0665.$$

Em que:

RPL = resistência à penetração do solo em laboratório (kPa);

Fp = força de penetração média (kgf);

0,1275 = área do cone (cm²);

98,0665 = transformação de kgf cm⁻² para kPa.

4.3.4 Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), foram usadas as mesmas amostras da curva de retenção. Com umidade estabilizada em cada tensão aplicada, foram coletados os dados necessários para determinação dos parâmetros.

O IHO foi determinado conforme Silva (1994) e Tormena (1998). Os limites superior e inferior de Ψ de -10 kPa e de -1500 kPa definirão o conteúdo de água respectivamente na capacidade de campo - θ_{CC} e no ponto de murcha permanente - θ_{PMP} . Em cada amostra determinou-se a umidade volumétrica (θ) em que a porosidade de aeração (PA) é de 10% - θ_P . A utilizando-se a expressão $[(1-D_s/D_p)-0,1]$, sendo D_p a densidade média de partículas. Para a determinação de θ em que a $RP = 2$ MPa (θ_{RP}) será utilizada a equação:

$$\theta_{rp} = (a.e^{bu}).$$

Onde: a,b são coeficientes da equação e u: teor de umidade

A determinação do IHO segue as seguintes condições:

(a) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) \Rightarrow IHO = $\theta_{cc} - \theta_{pmp}$;

(b) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) \Rightarrow IHO = $\theta_{cc} - \theta_{rp}$;

(c) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$) \Rightarrow IHO = $\theta_{pa} - \theta_{pmp}$;

(d) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$) \Rightarrow IHO = $\theta_{pa} - \theta_{rp}$.

Onde:

θ_{pa} = umidade volumétrica do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1$ m³ m⁻³.

θ_{cc} = umidade volumétrica na capacidade de campo (água retida a -10 kPa);

θ_{pmp} = umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (água retida na tensão de -1500 kPa);

θ_{rp} = umidade volumétrica quando a resistência do solo a penetração é maior ou igual a 2000 kPa.

Os valores de θ_{pa} , θ_{cc} e θ_{pmp} foram estimados por meio da curva característica de retenção de água (EMBRAPA, 1997), e os valores de θ_{rp} estimados por meio dos modelos de regressão ajustados para estimativa da resistência do solo à penetração em função da umidade.

4.3.5 Capacidade de retenção de água (CRA) pelo método do funil

A capacidade de retenção de água pelo método do funil, de acordo com a metodologia recomendada pelo UF IFAS Extension – SL447 (2017), foi determinada em laboratório utilizando-se amostras de solo deformadas coletadas no segundo semestre de 2018, mês de outubro, secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de 2 mm. Foram tomadas 50 g de cada amostra e transferidas para funil de vidro contendo papel filtro Whatman n.5, com 185 mm de diâmetro (Figura 6). Antes de iniciar o procedimento, determinou-se a umidade do solo em cada amostra. Usando funis conectados a mangueiras com dispositivo para vedação, foram adicionados 50 mL de água destilada ao solo, deixando em repouso por 30 minutos, dando tempo suficiente para a infiltração e saturação completa deste solo. Após o repouso, o excesso de água era drenado através da mangueira conectada ao funil e coletado em becker para determinação do volume drenado. A capacidade de retenção de água (CRA) foi determinada através da equação:

$$CRA = \{(50\text{mL} - Ad(\text{mL}) - AF(\text{mL}) + AS)\} / 50\text{g} \times 100$$

Onde: CRA = Capacidade de retenção de água

Ad = água drenada do solo (mL)

AF = água retida no papel filtro (mL)

AS = água inicialmente retida no solo seco (mL)



Figura 6. – Amostras de solo em funis, após processo de saturação, já em estado de drenagem. São Cristóvão, SE.

4.3.6 Determinação da umidade do solo através de monitoramento utilizando-se a Sonda Diviner e o sensor Arduino

Para as leituras de umidade com o perfilador DIVINER 2000, em cada tratamento, foram instalados 12 tubos de diâmetros externos e internos de, respectivamente, 0,0565 m e 0,051 m, e aproximadamente 0,30 m de comprimento (Figura 2), por onde a sonda foi introduzida e as leituras realizadas. A sonda faz leituras a cada 0,10 m, assim foi objetivado alcançar as profundidades de maior interesse e influência dos tratamentos bem como sua influência em camadas mais abaixo, para o sistema radicular do café, o qual está na faixa em torno dos 0,50 m.

No local onde estão instalados os tubos, foram feitos teste de resistência mecânica do solo à penetração, com o penetrômetro de impacto (Stolf, 2014), para avaliar possíveis restrições ao crescimento radicular e ao movimento da água no solo.

Após instalados os tubos e enumerados para auxiliar na identificação e suas entradas lacradas, a entrada que está enterrada no solo foi lacrada com emborrachado E.V.A. de aproximadamente 0,03 m, impedindo que a água presente no solo adentre no tubo pela parte de baixo. Durante o experimento, eram feitas vistorias para possíveis falhas na vedação na parte inferior, contudo em nenhum dos tubos houve falha na vedação, ou qualquer umidade que ocasionasse erro na leitura com a sonda. Na entrada superior, foi usado um CAP, comum de tubos de construção, de 3 polegadas e no centro emborrachado E.V.A, evitando assim qualquer falha que permitisse a má vedação para os tubos buscando evitar a entrada de solo, água da chuva ou irrigação, e animais diversos.

Ao final, obteve-se a umidade determinada pelo equipamento da relação da frequência (FR) com a umidade encontrada, de acordo com a equação:

$$\theta_v = 0,494 \times FR \times 3,017$$

Onde: 0,494 e 3,017 são parâmetros estabelecidos pelo fabricante.

As leituras de frequência (FR) com o DIVINER foram feitas antes do período de irrigação e tentou-se obter uma frequência diária, sempre no mesmo horário, para evitar maiores causas de variação e buscando observar o comportamento na capacidade de retenção de água no período de 24 horas.

Para a instalação do sensor Arduíno (Figura 3), foi montando um projeto que utiliza uma placa de prototipação eletrônica de código aberto, que utiliza a versão UNO. A placa apresenta entradas de pinagem, sendo elas analógicas e digitais. O software que controla os

pinos e os comandos da placa foram desenvolvidos no programa *Arduino Ide*, onde se tem o ambiente para o desenvolvimento para escrever os códigos para a placa.

Três sensores de umidade do solo com dimensões de 6 x 2 cm foram conectados à placa, a qual será fixada ao solo. Com o auxílio de Data Logger Shield (figura 7) para Arduino, foram realizadas as leituras de umidade do solo a cada 10 minutos. Essas eram armazenadas em um cartão micro SD. Os dados captados pelos sensores de umidade foram armazenados em módulo de cartão micro SD e a cada semana eram coletados os dados presentes no cartão. A alimentação foi realizada por uma bateria de 9V, e trocada sempre que necessário. Essas hastes emitem uma resistência à impedância que varia de 0 a 1023, assim quanto mais alto for o valor maior da resistência a passagem de corrente elétrica entre as hastes mais seco estará o solo, e quando menor a resistência temos um solo em maior estado de saturação, esta lógica é tida na programação como sendo a água um condutor de eletricidade, assim quanto maior o teor de umidade no solo menor será a resistência, tendo a corrente emitida chegando a outra haste de forma semelhante a saída.

O data logger shield apresenta um RTC (relógio e data) o qual auxilia na organização de dados, mostrando a data e horário de coleta de dados, além de possuir adaptador para armazenamento no cartão de memória. Assim, poderá ser obtido maior número de dados para um melhor monitoramento da umidade ao longo do tempo.

Os três sensores de umidade foram instalados próximos um do outro para melhor avaliação de suas performances.

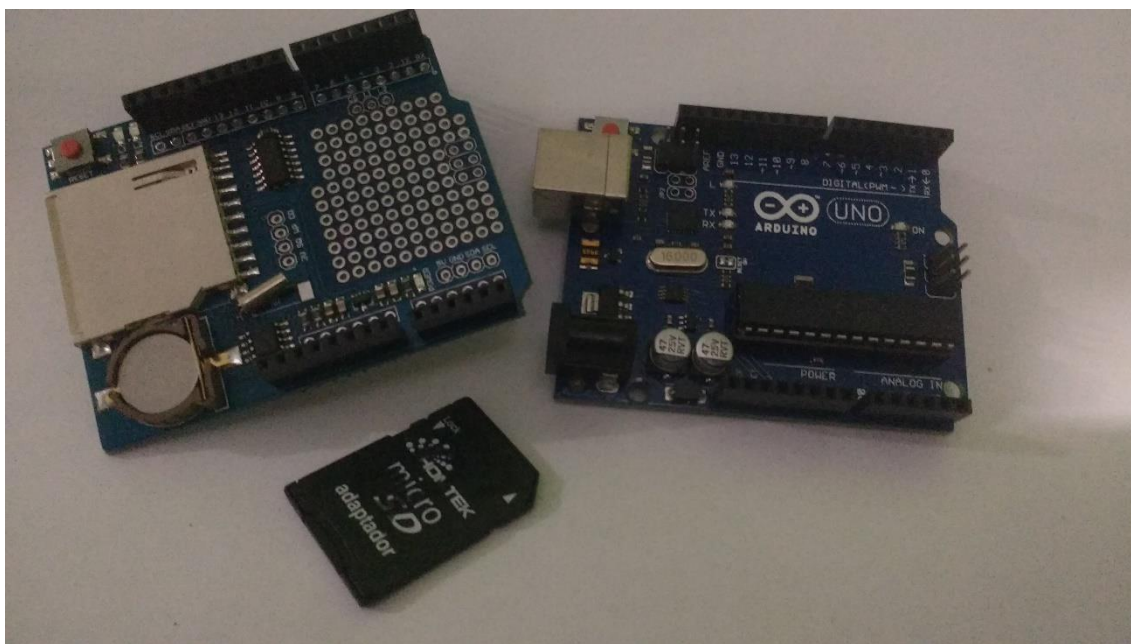


Figura 7 –Data Logger e Arduino Uno.

Assim poderemos indicar um método acessível aos pequenos agricultores, para seus perímetros irrigados, sendo que, no estado de Sergipe, a maior parte das áreas irrigadas que consomem grande volume de água são de pequenas e médias propriedades. Assim os pequenos produtores poderão adequar suas áreas irrigadas de forma mais eficiente, poupando os recursos hídricos, que em muitos casos são fornecidos em excesso a cultura.

4.3.7 Resistência mecânica do solo à penetração (RMSP)

A avaliação da resistência mecânica do solo à penetração em condições de campo foi feita através do penetrômetro de impacto (PI) modelo IAA/Planalsucar, com um ângulo de cone de 30°. Os dados foram transferidos para planilha eletrônica para os cálculos da RMSP em impactos dm^{-1} , através da fórmula:

$$N = (\text{número de impactos/ deslocamento da haste no solo (cm)}) \times 10$$

Os valores obtidos foram posteriormente transformados em Kgf cm^{-2} através da fórmula:

$$\text{RMSP (Kgf cm}^{-2}\text{)} = 5,6 + 6,89 N$$

Em seguida foi realizada a multiplicação dos valores de RMSP (kgf cm^{-2}) pelo fator 0,0980665, para a obtenção da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em MPa e a partir destes dados, foram gerados os gráficos de RMSP.

4.3.8 Avaliação do crescimento, nutrição e produção do café

A altura das plantas foi medida com auxílio de régua graduada e o diâmetro do caule a 2 cm do solo foi medido, com auxílio de paquímetro digital. Amostras de folhas de cafeeiro foram coletadas, devidamente lavadas, secas em estufa a 60°C, moídas em moinho tipo Wiley e digeridas em solução ácida em bloco digestor para determinação das concentrações de N e P, utilizando-se o método de digestão Kjeldahl (Silva, 2009). Após a digestão, uma alíquota da mistura foi separada para a determinação da concentração de P por colorimetria, através do método de Murphey e Riley (1962). Para a determinação do N_{total} , utilizou-se a metodologia da destilação com arraste de vapor, proposta por Kjeldahl (1883), 10 ml de hidróxido de sódio (NaOH) foram utilizados no destilador, em seguida foi transferido o extrato digerido de ácido sulfúrico H_2SO_4 e adicionando 10ml de ácido bórico, em erlenmeyer de 125 ml.

Os frutos foram coletados, figura 8, pesados in natura e após secagem em estufa a 60°C.



Figura 8. Frutos do cafeeiro na área experimental no dia da colheita. São Cristóvão, SE.

5 – RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Macro, micro, porosidade total e densidade do solo

Os resultados dos parâmetros físico-hídricos do Argissolo Vermelho amarelo distrófico típico, na camada de 0-10 cm, estão apresentados na Figura 9. A macroporosidade do solo variou de 25 – 37% (2017) e de 22 – 24% (2018); a microporosidade variou de 23-25% (2017) e 25-26% (2018) na área experimental, resultado semelhante ao encontrado por Herath et al. (2013) em um solo com biochar a partir da palha do milho, mesmo em solos distintos. Considerando que o solo ideal apresenta 1/3 de macroporos e 2/3 de microporos, a camada superficial do solo em estudo distancia-se desse padrão, o que é explicado pela característica textural do solo (mais de 85% da fração Areia).

Essa característica do solo favorece a rápida infiltração da água no solo e segundo Herath et al. (2013), o desenvolvimento da macroporosidade faz com que a condutividade hidráulica aumente, porém também permite a rápida evaporação, dificultando o manejo da irrigação. A camada do solo pode afetar o movimento da água em duas direções: os processos de infiltração descendentes e redistribuição da água e o aumento capilar ascendente durante o processo de evapotranspiração (LI et al, 2013). BASSO et al. (2013), em seu trabalho constatou que o solo que recebeu 6% de biochar perdeu significativamente ($P<0,05$) menos água para a drenagem e mais água para a evaporação em comparação ao solo tratado com 3% de biocarvão.

A presença de biocarvão e lodo de esgoto aumentou em 14% e 25,5% a macroporosidade do solo em 2017, um ano após a aplicação dos tratamentos com biocondicionadores, e em 8,33% inferior em 2018, dois anos após a aplicação. Não houve mudança significativa na microporosidade do solo, exceto para a área com biocarvão em 2017, porém, o aumento da macroporosidade refletiu no aumento da porosidade total do solo, da ordem de 14% e 16,7%, para o biocarvão e lodo, respectivamente, resultado semelhante ao de Sum e Lu 2014 que encontraram 16% para o solo trabalhado com biocarvão de lodo em relação ao controle.

Algumas praticas agrícolas intensivas resultam em degradação do solo através da perda de matéria orgânica do solo (ULYETT et al., 2014). O aumento da macroporosidade em resposta à adição de resíduos orgânicos resulta do estímulo à agregação do solo e melhoria na estrutura.

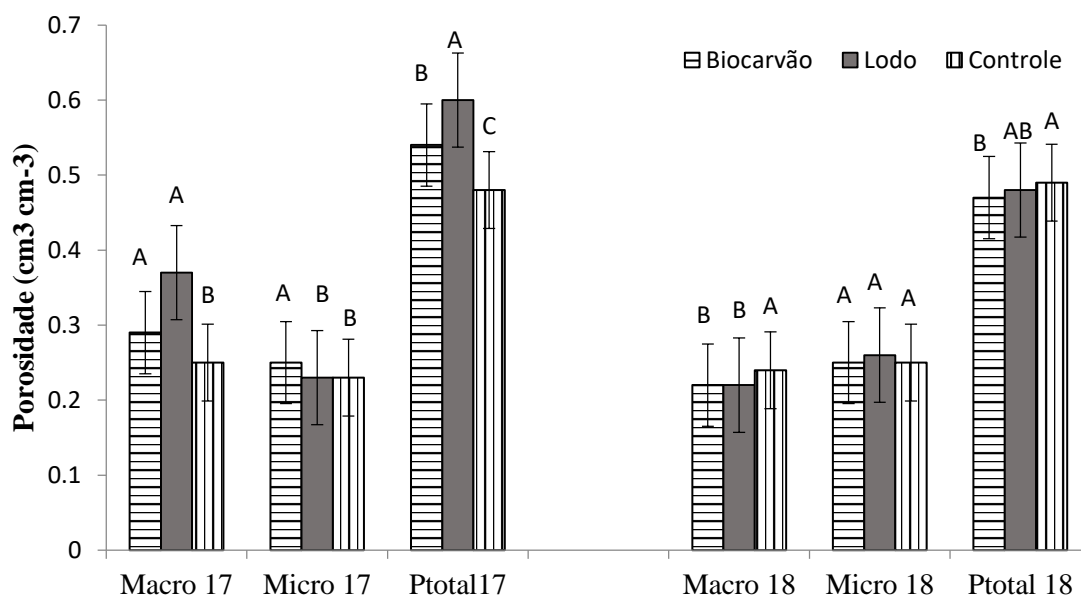


Figura 9. Parâmetros físico-hídricos (Macroporosidade, microporosidade e porosidade total) do Argissolo Vermelho amarelo Distrófico típico tratado com lodo de esgoto e bicarvão de lodo, na camada de 0-10 cm, aos 12 (2017) e 24 (2018) meses após a aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.- *Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O lodo de esgoto é caracterizado por alterar as propriedades físicas do solo, melhorando sua densidade, porosidade e capacidade de retenção de água (MARTINEZ, 2015). O melhor efeito do lodo cru na macroporosidade está relacionado ao seu elevado teor de carbono, o qual apresenta maior taxa de labilidade e, portanto, se decompõe mais rapidamente, estimulando a microbiota e o processo de agregação. A matéria orgânica presente no lodo de esgoto melhora o estado de agregação das partículas do solo, diminui sua densidade e aumenta a aeração (MELO & MARQUES, 2000).

Esse processo quando ocorre na camada superficial do solo, na profundidade de 0,10 m, onde os resíduos foram aplicados e incorporados, facilita a infiltração da água no solo, mas também promove alguma retenção em função da natureza adsorbtiva do material. É imprescindível compreender que, anteriormente ao armazenamento e retenção de água pelo solo, é necessário que a água penetre e se distribua ao longo do perfil (KLEIN; KLEIN, 2015). Esse efeito esponja permite chegar um volume maior em curto período de tempo em camadas mais profundas, principalmente na profundidade de 0,20 a 0,60m, onde se concentram em torno de 60% das raízes de culturas agrícolas. Essas camadas sendo abastecidas, as plantas apresentam maior desenvolvimento, como foi observado nas plantas de

café. Isso também reduz as perdas de água por evaporação ou escoamento em superfície, garantindo maior aproveitamento da irrigação.

O lodo de esgoto tem elevação dos macroporos, semelhante aos biochar, Herath et al. (2013) citando Leifeld et al. (2007) que fatores como a mobilidade do biochar dentro do perfil do solo são importantes, particularmente no que diz respeito aos benefícios para a produção das plantas e o movimento para as águas subterrâneas e superficiais.

Resultado semelhante foi observado por Herath et al. (2013). Os autores observaram mudanças na porosidade, e estas refletiram nas propriedades hidráulicas do solo e na produtividade da planta.

Essa melhoria na macroporosidade do solo é de grande valia, visto que os solos dos tabuleiros apresentam, em camadas mais profundas, o caráter adensado ou coeso, que, apesar de ocorrer de forma natural, pode ser agravado pelo manejo. É necessário considerar o potencial de avaliação crítica do biochar no solo para melhoria da impedância/compactação (ATKINSON et al, 2010). Este mesmo autor fala que alguns solos com camadas coesas e baixa infiltração podem ficar encharcados e apresentar crescimento restrito as raízes e desenvolvimento da planta. A maior capacidade de transporte de água em camadas mais profundas possibilita maior desenvolvimento das plantas, principalmente na presença de camadas mais rígidas, como é o caso da camada coesa. Essa camada quando úmida oferece menor resistência ao desenvolvimento das raízes, aumentando a área de absorção e o maior aproveitamento de água e nutrientes.

O aumento da microporosidade com o tempo pode ser atribuído à fração de cinzas que inicialmente entupiam os microporos no carvão (HERATH et al, 2013). A porosidade total do solo variou de 48 – 60% em 2017 e de 47 – 49% em 2018. Solos com alto teor de areia como o solo em estudo apresentam uma variação de porosidade total de 30-50%, portanto, no presente trabalho, a adição de lodo de esgoto e de seu biocarvão aumentou o volume total de poros do solo em torno de 25% e 12%, respectivamente, um ano após o manejo. Maria (2007) encontrou em seus estudos que a aplicação de biocarvão da cultura do milho, que sua adição provocou um aumento na porosidade total, e uma diminuição na densidade.

A densidade do solo variou de 1,47 a 1,57 g cm⁻³, porém os valores estão na faixa normalmente encontrada para solos arenosos livres de compactação. Houve efeito significativo dos tratamentos para essa variável, sendo lodo < biocarvão < controle. Resultado semelhante ao encontrado por Ulyett et al. (2014) ao trabalhar em solo orgânico e solo convencional, que apresentou resultados de densidade de 1,42 g.cm⁻³ para solo de manejo orgânico, e 1,56 g.cm⁻³ para solo com manejo convencional, após adição de biocarvão.

O aumento da macroporosidade, além de influenciar no aumento da porosidade total, também refletiu na redução da densidade do solo (Figura 10). A redução mais suave da Ds no solo com biocarvão pode estar relacionada à textura fina do biocarvão, possibilitando entupimento de poros, como pode ser confirmado pelo aumento da microporosidade, na primeira avaliação. Nesse aspecto, o aumento dos microporos pode ser benéfico pois aumenta a retenção de água no solo arenoso. O tamanho da partícula, a forma e a estrutura interna do biocarvão provavelmente desempenham papéis importantes no controle do armazenamento de água no solo, pois alteram características dos poros (LIU et al., 2017).

O aumento da microporosidade pode ser ainda mais evidente em outros tipos de biocarvão, principalmente os de origem vegetal, por apresentar canais como o xilema ou floema de restos de plantas, esses micros condutos, após a pirolise, elevam a microposidade do biocarvão e aumentam a capacidade de retenção de água, como afirma Sum e Lu (2014) que para aumento relativo da porosidade total entre 6% de biochar e tratamento de controle foi de 29% para biocarvão de palha, 12% para biocarvão de cavacos e 16% para o biocarvão de lodo de esgoto, respectivamente, a palhada ao ser carbonizada deixar mais poros de diâmetro maiores, além do que o lodo já tem estado acelerado de degradação, sendo sua influencia como biocarvão no solo principaomente nos microporos.

Hill et al. (1985) diz que o auemnto da densidade do solo pode proporcionar maior quantidade de água disponível as plantas, porem esses efeitos variam com a granulometria e o teor de matéria orgânica no solo.

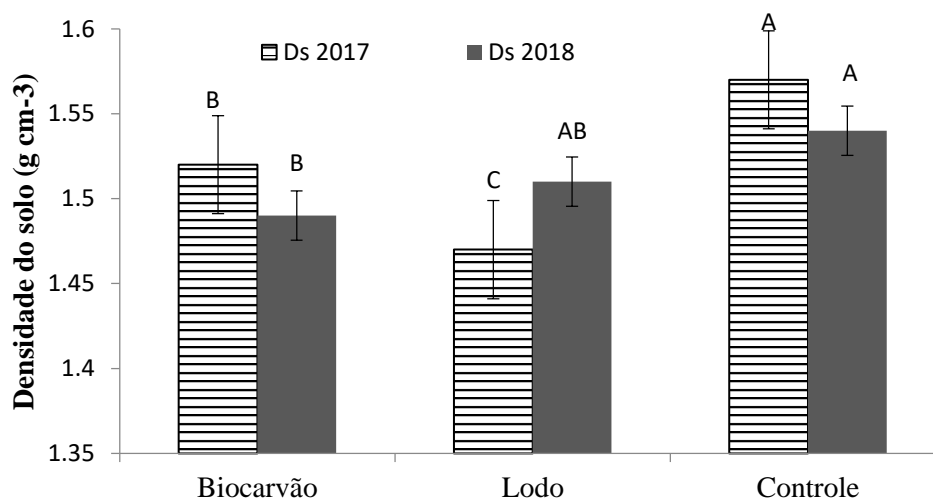


Figura 10. Densidade do solo (Ds) do Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico tratado com lodo de esgoto e bicarvão de lodo, na camada de 0-10 cm, aos 12 (2017) e 24 (2018) meses após a aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.- *Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Um ano após a primeira avaliação, ou seja, em 2018, foram feitas novas coletas para avaliação do efeito dos tratamentos em profundidade. TAVARES (2006) cita Marques (1997), que mesmo após um ano a adição do lodo de esgoto em um Latossolo Vermelho-Escuro obteve aumento nos teores da matéria orgânica. Sort & Alcaniz (1999), com recuperação de área degradada, mostram que efeito positivo na agregação, entretanto, após um ano esse efeito havia decrescido substancialmente. Traz ainda que como esses autores não obtiveram efeito duradouro da aplicação do lodo de esgoto, outros não observaram efeito do lodo na matéria orgânica e na agregação.

Os resultados estão apresentados na Tabela 2 Independente do tratamento, observa-se que houve redução da macroporosidade e da porosidade total do solo, e aumento na densidade do solo nas camadas subsuperficiais, mostrando uma tendência natural ao longo do perfil do solo. Isso ocorre não apenas em função do peso das camadas sobrejacentes, mas também pela redução no teor de matéria orgânica. Atkinson et al. (2010) que o biochar fornece uma rota pela qual a umidade do solo pode ser conservada, sendo assim uma ferramenta útil a melhoria da paisagem, principalmente em regiões de solos arenosos, como em regiões áridas, onde a umidade é fator primordial ao estabelecimento de vegetação e culturas.

Além disso, a arrumação natural das partículas bem como o peso dos equipamentos de preparo do solo reflete no empacotamento denso das partículas em profundidade, reduzindo sua macroporosidade. Assim, a macroporosidade reduziu em média de 23% na camada superficial para 15% (10-20cm) e 14% na camada de 20-10cm. Já a D_s passou de $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ (0-10 cm) $1,67 \text{ g cm}^{-3}$ (10-20 cm) e $1,74 \text{ g cm}^{-3}$ (20-40 cm). A elevação na densidade era esperada em função da movimentação de pessoas na área para capinas, efeito “splash” pela irrigação ou chuvas que causam pressão no local de queda das gotas e acomodação natural do solo.

MARIA (2007) faz referencia em um ensaio de recuperação de solo degradada, constataram que o principal efeito do lodo de esgoto foi o aumento da estabilidade de agregados ao impacto de gotas de chuva logo após a aplicação do lodo. Não foi observado efeito significativo dos tratamentos em profundidade, mostrando que não houve migração dos resíduos ao longo do perfil.

Tabela 2. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo (Ds) do Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico tratado com lodo de esgoto e bicarvão de lodo, nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, 24 meses após a aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.- *Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tratamento	Macroporosidade (cm ³ cm ⁻³)	Microporosidade (cm ³ cm ⁻³)	Porosidade Total (cm ³ cm ⁻³)	Ds (g cm ⁻³)
Profundidade 0-10 (cm)				
BIOCARVÃO	0.22 B	0.25 A	0.47 B	1.49 B
LODO	0.22 B	0.26 A	0.48 AB	1.51 AB
CONTROLE	0.24 A	0.25 A	0.49 A	1.54 A
Profundidade 10-20 (cm)				
BIOCARVÃO	0.17 A	0.26 A	0.43 A	1.64 A
LODO	0.14 B	0.27 A	0.42 A	1.70 A
CONTROLE	0.15 B	0.25 A	0.40 A	1.68 A
Profundidade 20-40 (cm)				
BIOCARVÃO	0.14 A	0.25 A	0.39 A	1.73 A
LODO	0.14 A	0.25 A	0.38 A	1.69 A
CONTROLE	0.15 A	0.24 A	0.39 A	1.79 A

O solo com lodo cru apresentou comportamento esperado, pois a matéria orgânica que foi incorporada ao solo sofre rápido degradação, ainda mais em regiões tropicais onde a radiação solar acelera essa degradação, alguns efeitos como a liberação mais rápida de nutrientes é um ponto relacionado, que auxilia no fornecimento de nutrientes às culturas empregadas na área. Herath et al. (2013) afirma que o clima tropical, particularmente com temperaturas altas e chuvas são fatores importante na deteriorização do carbono orgânico, e a matéria orgânica varia consideravelmente dependendo do tipo de solo.

Esta matéria orgânica auxilia na agregação de partículas de solo e o efeito da matéria orgânica na agregação do solo pode ser observado pela relação entre o teor de matéria orgânica no solo (MO) (MARIA et al. 2007), e com a rápida decomposição, esses solos apresentam poros de tamanhos diversos, sendo mais rápida a infiltração, independente da fonte hídrica, chuva ou irrigação, foi o tratamento onde houve a queda mais perceptível da macroporosidade, na microporosidade praticamente se manteve, isso mostra que o lodo cru

tem suas ações mais sentidas na macroporosidade, e o biocarvão na microporosidade, além de efeitos mais sentidos a longo prazo (HERATH et al, 2013).

Este foi o tratamento que apresentou maior queda na porosidade total com 25% e aumento na densidade em uma faixa de tempo de um ano. Como é um solo que se apresenta muito poroso após a incorporação, as possíveis ações antrópicas como passagem, pisoteio de pessoas ou ação natural ocasionam a compactação, esses poros agora vazios não apresentam resistência a compactação, assim tendem a perder ao longo do tempo as suas propriedades antes elevadas nos primeiros anos.

Já o solo controle, o qual não houve nenhuma atividade para um bom condicionamento do solo, os valores praticamente foram iguais, não havendo ao longo do tempo alguma alteração de forma benéfica pela cultura ali presente. Porém, mesmo pequenos aumentos que podem ser adicionados a qualidades do solo são cruciais para a planta. Ambos os condicionadores, biocarvão e lodo de esgoto, apresentaram bom desempenho para porosidade e densidade, cada um com seus atributos advindos de sua condição inicial de adição ao solo. O biocarvão é um material de baixa densidade e é mais resistente à compressão que o solo (ULYETT et al., 2014). Contudo, vimos que o biocarvão realmente apresenta bons resultados com o decorrer do tempo, pois sua lenta decomposição e interação com o solo, após anos de sua aplicação, ainda se mostra eficiente e eficaz no que está proposto sua utilização.

E diferente de materiais orgânicos de fácil decomposição no solo, que com tempo não se tornam eficientes quando o solo está sujeito a compressões como tráfego de máquinas ou pessoas, as suas propriedades ajudam a manter a densidade por maiores períodos. Biocarvão é um material de baixa densidade e é mais resistente à compressão no solo (ULYETT et al., 2014). Stefan et al. (2013) também constatou que o biocarvão traz aumento da porosidade total e redução da densidade. O presente trabalho mostra uma possibilidade de utilização de forma conjunta destes condicionadores para estudos futuros.

5.2 Curva característica de retenção de água

O solo é conhecido pelo seu robusto potencial na armazenagem de água (KLEIN; KLEIN, 2015). As modificações provocadas pelo revolvimento na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico, alteram as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas em sistemas de irrigação (SILVA et al., 2015). Solos com valores de areia em torno de 80%

possuem dificuldade de armazenamento de água, como é o caso do solo trabalhado onde todas as áreas possuem valores acima de 80% em as profundidades, assim onde a água que é depositada logo se infiltra ou perdida por evaporação.

O aumento no teor de água no solo ou capacidade de retenção de água de um solo tratado com biocarvão provavelmente terá maiores benefícios em solos arenoso (ATKINSON et al, 2010) ao longo do tempo. Sabe-se que o aumento do teor de matéria orgânica, especialmente nos solos tropicais, é importante para a retenção de nutrientes e manutenção de propriedades físicas adequadas (BARBOSA; FILHO, 2006). Os solos arenosos apresentam maior quantidade de água disponível para a planta após receber biocarvão, para o solo em estudo ficou em 12,20 % a mais que o solo controle, próximos dos valor encontrado por SIGNOR E DEON (2017) com 11% em solo argiloso no semiárido, estes autores ainda citando trabalhos de NOVAK et al. (2006 e 2017), sobre a retenção de solos após adição do biocarvão falam que biocarvão em um solo arenoso (74% de areia) aumenta em até 15,9% a retenção de água no solo, e observaram que a adição de 2% de biocarvão praticamente dobrou o conteúdo de água disponível.

Esse comportamento foi observado na primeira tensão aplicada, -6 Kpa, onde o lodo apresentou maior capacidade de retenção, seguido pelo biocarvão, como mostra a figura 11.

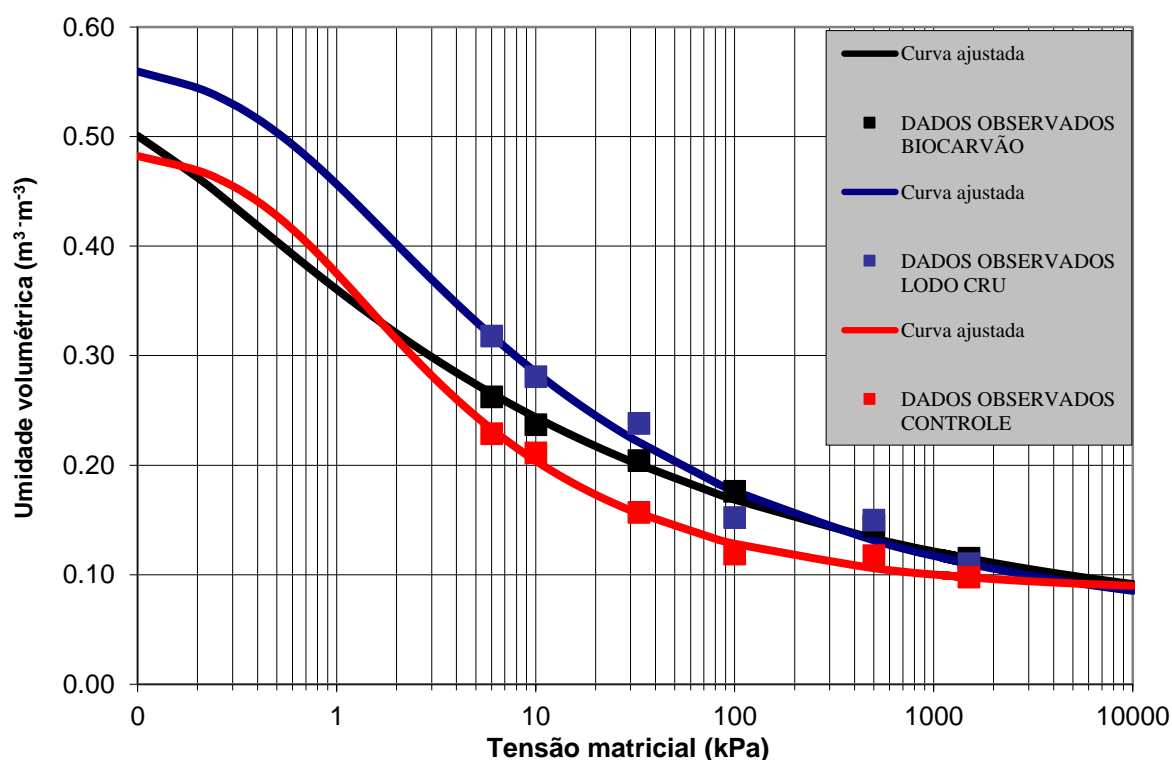


Figura 11 – Curva característica de retenção de água no Argissolo Vermelho amarelo Distrofítico típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.

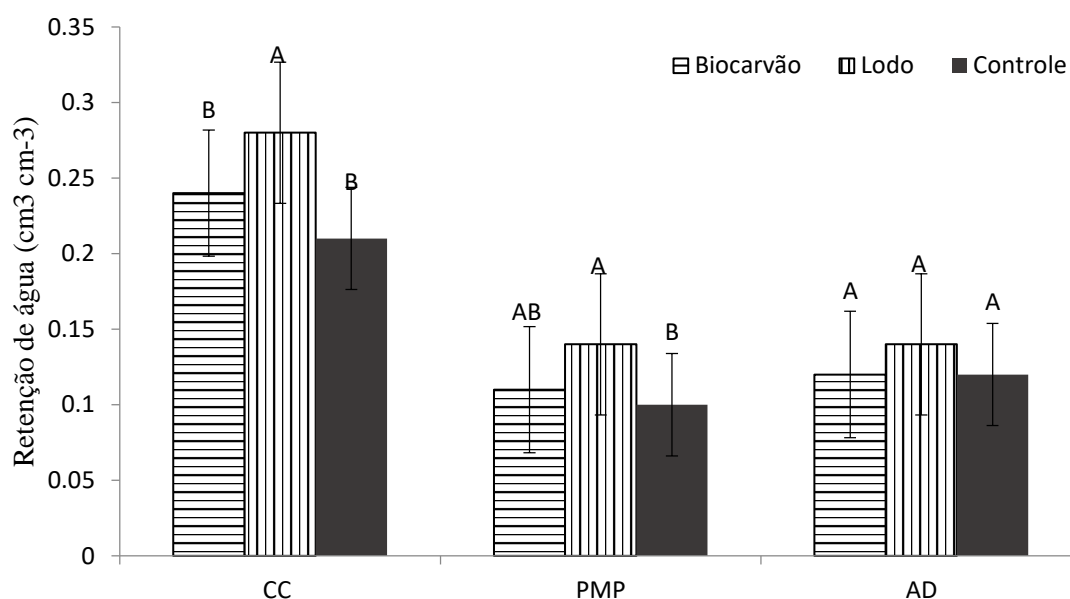


Figura 12. Capacidade de de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE. *Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

BASSO et al. (2013) cita que para biocarvão, houve um aumento da retenção nos potenciais matriciais entre 0 e 10 KPa pelo efeito capilar e da distribuição e da distribuição dos poros. Aumentos na matéria orgânica do solo provavelmente aumentarão a disponibilidade de água (ATKINSON et al, 2010). Este mesmo autor que aumento no teor de água no solo ou capacidade de retenção com biochar terá efeitos benéficos mais sentidos em solos arenosos.

Cada vez mais se busca formas de armazenar água no solo, de forma que este solo tenha aumento de produção com baixo consumo de água, e resistência a veranicos. Portanto, torna-se necessário que os agentes envolvidos com a produção agrícola adotem estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água para as plantas (KLEIN; KLEIN, 2015). Nos trópicos é comum a permanência de vegetação de baixo portes entre linhas, roçagem e permanência das aparas nos locais, evitando o contato direto da radiação solar ao solo, plantio em mulching (LI et al., 2013) em hortaliças evitando perda de umidade para a atmosfera, tudo isso tentando manter essa água proveniente de chuvas ou irrigação o maior tempo possível disponível as plantas.

A utilização do bio sólido na agricultura como adubo orgânico é reconhecida, como uma das alternativas mais promissoras para disposição final deste resíduo (MARTINEZ, 2015). Nestas questões se apresentam como uma nova alternativa o biocarvão e o lodo cru de esgoto, além de ser ecológicos por da alternativa ambientalmente correta e sustentável, pois como a palavra de forma primitiva *sustentare* que tem como significados favorecer e cuidar sugere. Visto a escassez de água, se tem água está esteja de forma potável ou de condição de uso. A qualidade da água torna-se finita devido às práticas humanas inadequadas de extração, consumo e poluição deste precioso recurso natural (SANTOS; PEREIRA, 2013).

Esse lodo cru das estações de tratamento de esgoto que antes prejudicavam agora são empregados de forma a favorecer o desenvolvimento de plantas, cuidando do solo para o aporte de novas culturas, tanto como recuperação de áreas degradadas (MARIA; KOCSSI; DECHEN, 2007) ou mesmo culturas agrícolas (TAVARES, 2006). Para que a produção de alimentos aumente com qualidade e sem necessitar de irrigações adicionais, é necessário que os estudos sobre este tema continuem especialmente em campo e em solos característicos no Brasil (KLEIN; KLEIN, 2015). A matéria orgânica permite maior agregação e coesão entre as partículas, tornando o solo mais poroso e com maior retenção de água, beneficiando a infiltração (SANTOS; PEREIRA, 2013).

Temos em destaque com maior capacidade retenção em baixas tensões foi o solo com lodo de esgoto cru, comportamento esperado pela adição de matéria orgânica, o qual se assemelha a solos conservados de mata nativas onde apresenta valores consideráveis de matéria orgânica advindo de forma natural da floresta sobre o solo. Esse efeito também pela capacidade de absorver maiores volumes de água, por sua estrutura, e Klein e Klein (2015) citam STEVERSON (1994) ao dizer que a matéria orgânica retém vinte vezes mais a sua massa em água. A adição de alteradores do solo, tais como matéria orgânica, incluindo o biocarvão, pode alterar as propriedades do solo e aumentar a sua capacidade de retenção de água, criando espaços poroso adicional e a área superficial (YU et al., 2017).

Onde nos primeiros centímetros temos um solo com baixa densidade, maior quantidade de macroporos vinda pela adição da matéria orgânica. Adicionar regularmente grandes quantidades de materiais orgânicos é uma estratégia comum para melhorar a disponibilidade hídrica dos solos (KLEIN; KLEIN, 2015). Solos arenosos como o solo em estudo apresentam baixa área superficial (ABEL, Stefan et. al., 2013; HERATH; CAMPS-ARBESTIAN; HEDLEY, 2013), sendo solos de difícil retenção se não forem tratados com condicionadores, principalmente em regiões tropicais onde a degradação da matéria orgânica

se dá de forma mais rápida, por isso a adição regular de biocarvão ou lodo é fator vantajoso em diversos sentidos.

SILVA (2005) citando BISCAIA (1996) que diz que as condições de clima tropical e subtropical com muita umidade e temperaturas elevadas são fatores que aceleram a degradação da matéria orgânica; por esta razão o manejo inadequado do solo Agrícola que pode reduzir a capacidade produtiva dos solos; e a adição de matéria orgânica é importante para a manutenção e até melhoria do potencial produtivo desses solos.

O aumento do teor de matéria orgânica tende a aumentar a área superficial específica do solo, com consequente aumento na retenção de água no solo, elevando os valores dos limites de plasticidade (KLEIN; KLEIN, 2015). ABEL et. al. (2013) observaram que em sua pesquisa com biocarvão houve correlação entre a área de superfície específica e volume de água no ponto de murcha permanente. YU 2017, traz resultados positivos do biocarvão, em trabalho com solos areno-argiloso que o biocarvão de cicuta e grama aumentaram a capacidade de retenção de água no solo, mesmo em diferentes tensões. Para o ponto de murcha permanente, o lodo apresenta maior teor de água no solo, porém não sendo mais disponível, resultado já previsto segundo Klein e Klein (2015) citam STEVERSON (1994) ao dizer que mesmo com sua capacidade de retenção ser muito alta, parte fica retida nas estruturas internas, sendo de baixa disponibilidade para as plantas. Vale observar que mesmo com pontos positivos e negativos a adição da matéria orgânica deu a este solo um maior volume de água disponível para as plantas,

Para o biocarvão de lodo de esgoto tivemos bons resultados, mostrando que na camada onde foi aplicado houve aumento da capacidade de retenção em baixas tensões e em altas tensões, elevando a CC de forma considerável e PMP acima do solo em controle. Abel et al., 2013 obteve aumento do teor de água no ponto de murcha permanente em relação ao controle. Foi observado um aumento da capacidade de campo, como observado por Herath et al. (2013) e Atkinson et al. (2010), LIU et al. (2017).

Nas tensões de 0 a 10 KPa observou valores com pequenas elevações em comparação ao controle, porém era esperado pois o biocarvão apresenta maior relação com microporos, porém em tensões de -33 KPa e acima houve aumento, resultado semelhante ao observado por LIU (2017), em pesquisa com biocarvão e areia. A aplicação de biocarvão aumentou a quantidade de água no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo do solo tanto no Vertissolo quanto no Argissolo, com efeitos de maior intensidade nesse último (SIGNOR; DEON, 2017), Herath et al. (2013) observou aumento significativo 30, 1000 e 1500 KPa, em

comparação a um solo controle, resultado semelhante a este trabalho, onde houve uma elevação do teor de umidade nestas tensões.

Esse aumento na retenção é fato importante, dando maior períodos de permanência de água nesse solo, auxiliando e dando maior capacidade de desenvolvimento de qualquer cultura agrícola empregada na área. O biocarvão, devido à sua porosidade e, consequentemente, a sua alta superfície específica, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, sobretudo em solos de textura arenosa (PETTER et al., 2016). Este mesmo autor ainda traz que a área de superfície específica do biocarvão que pode chegar a $400 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ é comparável à da argila e superior à da areia, ABEL et. al. (2013) traz valores mais expressivos para a área superficial do biocarvão com $3000 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ao citar GUO et al. (2002), e esta propriedade está relacionada ao microporos do biocarvão. Herath et al. (2013) ao encontrar aumento na umidade volumétrica no seu trabalho fala que esta relacionado a oxidação da superfície do biocarvão, que proporciona aumento da hidrofobicidade. Durante a degradação abiótica e biótica do biocarvão no solo, há uma tendência de aumentar a atividade microbiana sobre o mesmo e consequentemente do solo (PETTER et al., 2016). Essa biota, fungos, bactérias ou demais podem ser organismo que interajam com o cafeeiro e aumentem sua capacidade de sobrevivência, desenvolvimento e produção.

O biocarvão demonstrou, em condições de laboratório, possuir grande potencial para aumentar a retenção de água em solos da região Semiárida (SIGNOR; DEON, 2017). O biochar de lodo usado neste trabalho aumentou a CC, PMP e por essa relação a água disponível para a planta, como já dito na literatura sobre seus efeitos positivos. Os intraporos aumentaram a capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível (LIU et al., 2017).

Assim apresentam resultados importantes, visto que muito pouco se tem de resultados em campo, visto que quase em sua totalidade são feitos em laboratórios e quase nada em situações reais de ambiente, a maioria de trabalhos encontrados são em casa de vegetação, sendo que os intemperes ocorrem de forma diferentes, como mudanças de temperaturas, chuvas excessivas, são situações comuns em campo e não são testadas em laboratório, podendo mascarar resultados. O que já se mostra que mesmo assim sofrendo ações naturais de climatológicas o biocarvão se destaca como bio condicionador do solo.

5.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração é uma das propriedades do solo (RMPS) altamente influenciada pela umidade e que determina o crescimento do sistema radicular das

plantas. No presente estudo, essa variável foi avaliada em condições de campo e em laboratório. A RMSP na camada de 0-10 cm, realizada em amostras indeformadas em laboratório, está apresentada na Figura 13. Essa avaliação da resistência é diretamente relacionada à umidade do solo, uma vez que as medidas são feitas para cada estado de umidade do solo, no intervalo que compreende a curva de retenção de água. Por essa razão, têm-se uma avaliação mais precisa da influência da umidade no comportamento mecânico do solo.

A RMSP foi abaixo de 2000 kPa em todos os tratamentos, portanto não há impedindo ao crescimento do sistema radicular das plantas nessa profundidade do solo (Giarola et al., 2011). Observa-se que, quando o teor de umidade do solo se encontra entre 10 e 15%, que nesse solo está abaixo da umidade na capacidade de campo (Figura 15), a presença dos resíduos orgânicos contribui para a redução da RMSP. Porém, essa diferença desaparece entre os tratamentos em teores de umidade acima de 20%. A presença de lodo de esgoto foi mais efetiva em reduzir a RMSP do que o biocarvão, o que está coerente com a maior capacidade de armazenamento de água no solo tratado com lodo (Figura 15).

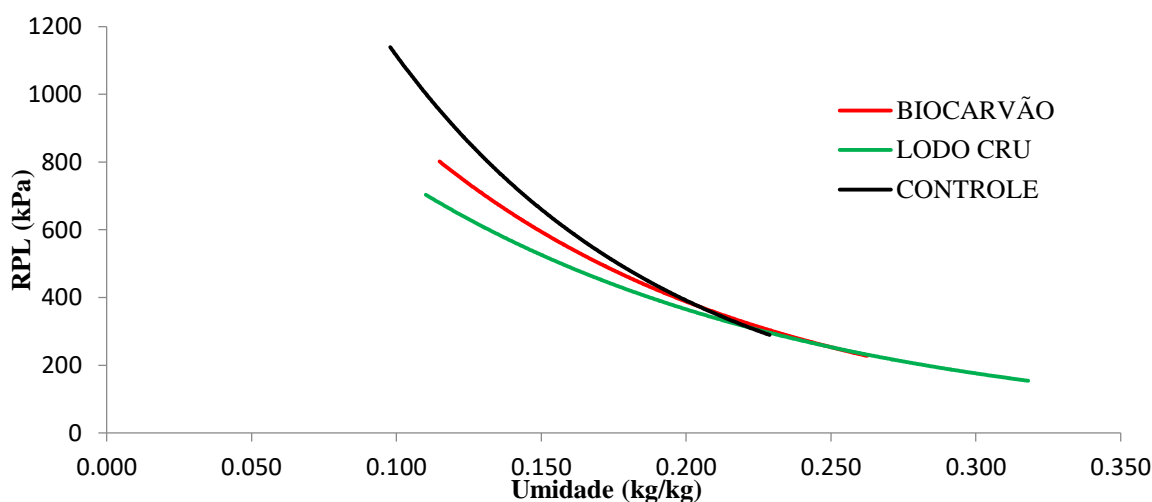


Figura 13 – Resistência a penetração em laboratório na camada de 0,0-0,10 metros no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.

O solo sem resíduo apresentou maior RMSP, resultado que já era esperado, pois um solo já cultivado há anos normalmente apresenta maior densidade do solo em função da destruição dos agregados, gerando maior densidade. A densidade do solo altera o ângulo de atrito interno por estar relacionada ao arranjo espacial das partículas, que está diretamente

relacionado com o número de pontos de contato entre estas; para um mesmo material, o atrito é tanto maior quanto maior for a densidade do solo e, conseqüentemente, maior quantidade de pontos de contato entre as partículas sólidas do solo (PACHECO et al., 2011).

A menor RMSP após a adição do lodo cru pode ser explicada pelo fato de a matéria orgânica auxiliar na agregação do solo e gerar poros de tamanhos mais elevados, que após decomposição se tornam rotas para as raízes, maior volume de poros para infiltração. Em relação à recuperação de áreas degradadas, a aplicação de lodo proporciona rápido estabelecimento e crescimento de gramíneas e leguminosas (BARBOSA; FILHO, 2006). Essas gramíneas e leguminosas, em trabalhos no platô de Neópolis, já demonstraram ser eficazes em melhorar as condições de resistência a penetração, por seguir o padrão do lodo cru, que essas plantas cumprem seu ciclo, e, após sua morte, as raízes se decompõem e formam macroporos, eficiente em infiltração de água, rota alternativa as raízes das culturas agrícolas e redução da densidade.

A resistência mecânica do solo à penetração em condições de campo está apresentada nas Figuras 15, 16, 17, 18 e 19. Os resultados estão apresentados por área em função da grande variabilidade espacial. Como já era esperado, a área de estudo apresentou uma grande variação. Isso pode ser explicado pela constante passagem de pedestres pela área experimental durante aulas práticas de várias disciplinas. Esse problema se intensificou em função do pisoteio ter ocorrido muitas vezes quando o solo estava muito úmido, já que houve irregularidade no padrão da irrigação na área experimental.



Figura 14 – área com passagem de escoamento da água após precipitações.

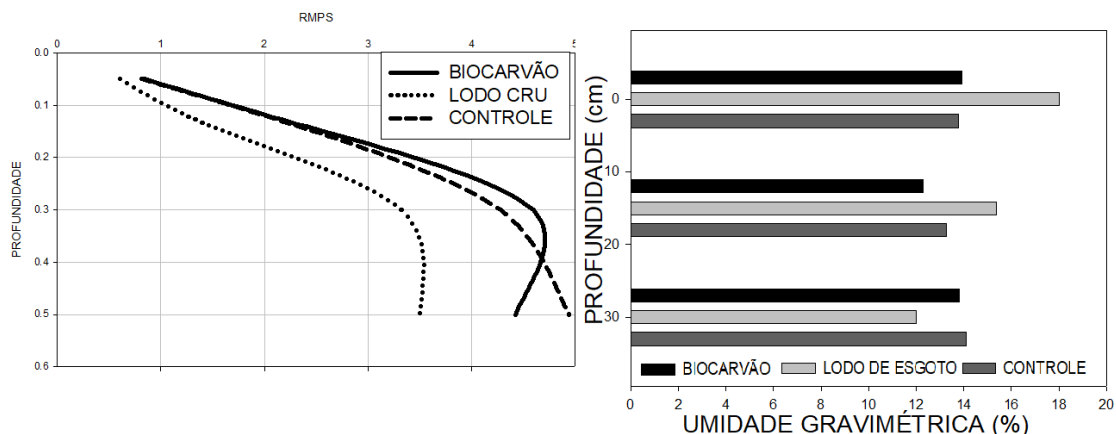


Figura 15 – Valores médios de resistência mecânica à penetração e de umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE.

Como foi dito acima, a área ao longo do tempo apresentou muita variabilidade, principalmente pela leve inclinação em um pequeno trecho da área. Por essa razão, para essa variável, optou-se por apresentar também os resultados para cada área. A área 1 (bloco 1) apresenta de forma geral uma textura muito arenosa, classificada como Areia até a camada de 20 cm (Tabela 3). A umidade na camada superficial foi maior do que em subsuperfície, possivelmente em razão da presença de maior quantidade de matéria orgânica. Porém, é possível observar que houve redução da RMSP nos tratamentos com lodo e biocarvão (Figura 16). A pressão de pré-compactação e a resistência mecânica do solo à penetração tornaram-se maiores à medida que o solo ficava mais seco, em profundidade. Isso acontece porque a água atua de duas formas sobre a resistência do solo ao cisalhamento: diminui a coesão entre as partículas sólidas e forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre elas (PACHECO et al., 2011).

ÁREA 1	Areia	Argila	Silte	Classe textural
0.00-0.10	86.50	2.85	10.63	Areia
0.10-0.20	87.54	2.86	9.59	Areia
0.20-0.30	81.27	7.88	10.84	Areia franca

Tabela 3 – Textura do solo na área 1 do experimento.

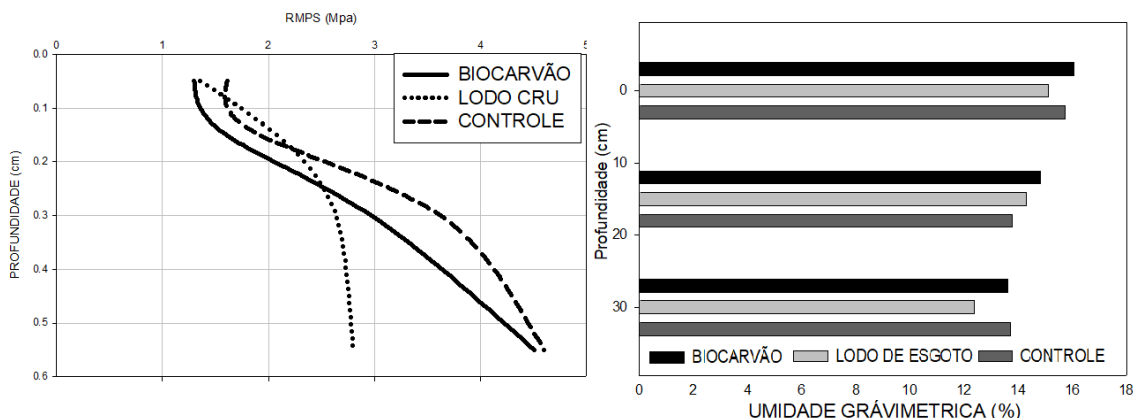


Figura 16 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofico típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 1.

Na área 2 (bloco 2), verifica-se que houve perda de parte da camada superficial do solo ao longo de cultivos anteriores, evidenciado pela textura da camada superficial (Areia Franca) (Tabela 4). Nessa área, as diferenças entre os tratamentos aparecem em camadas mais profundas, a partir dos 30 cm, onde a resistência se torna muito elevada (Figura 17) mesmo em condições adequadas de umidade.

ÁREA 2	Areia	Argila	Silte	Classe textural
0.00-0.10	87.73	6.81	5.45	Areia franca
0.10-0.20	86.06	7.64	6.28	Areia franca
0.20-0.30	84.40	8.49	7.10	Areia franca

Tabela 4 – Textura do solo na área 2 do experimento.

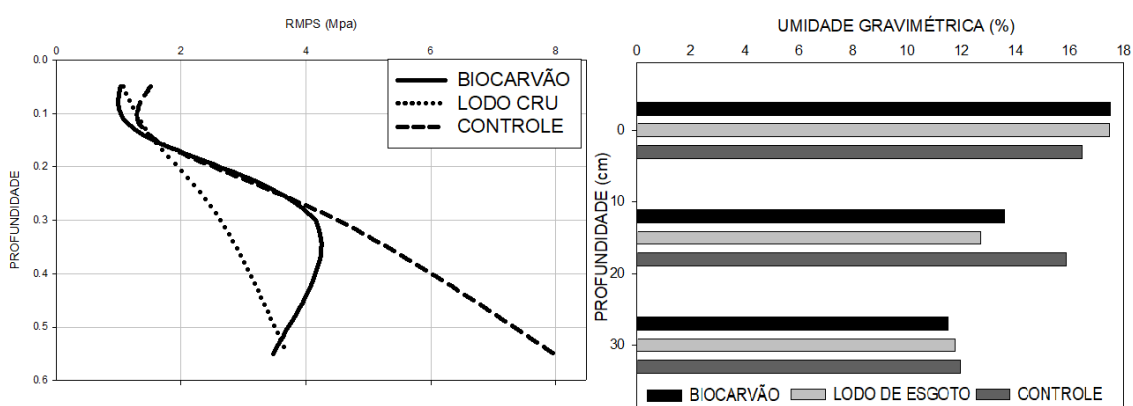


Figura 17 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofico típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 2.

Na área três (bloco 3), também se observou diferença textural com relação à área 1 e à área 2, com evidência de que a camada erodida é mais espessa, pois a partir de 20 cm de

profundidade, há mudança textural, com presença de mais argila e menos areia (Tabela 5). Nessa área, a presença de lodo e de biocarvão elevaram a umidade do solo e contribuíram para reduzir a RMSP (Figura 18) até os 20 cm de profundidade. À presença de partículas mais finas nessa área, ao mesmo tempo em que tem o potencial de aumentar a agregação e melhorar a estrutura do solo, também pode aumentar os risco de compactação e influenciar de forma negativa no desenvolvimento das raízes.

ÁREA.3	Areia	Argila	Silte	Classe textural
0.00-0.10	84.61	5.14	10.2	Areia franca
0.10-0.20	82.94	7.43	9.61	Areia franca
0.20-0.30	79.59	9.74	10.6	Franco arenoso

Tabela 5 – Textura do solo na área 3do experimento.

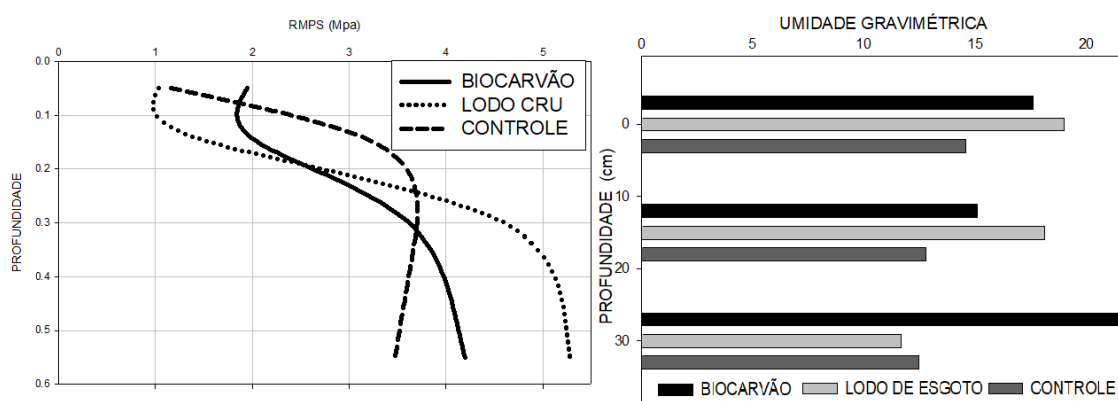


Figura 18 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 3.

Na área 4 (bloco 4), observa-se o perfil textural (Tabela 6) semelhante à área 1, porém há diferenças marcantes entre os tratamentos, tanto com relação à umidade quanto com relação à RMSP (Figura 19). Nessa área, a camada coesa aparece de forma bastante evidente entre as profundidades de 20-40 cm. Observa-se que o lodo de esgoto aumentou a umidade do solo e em função disso, reduziu a RMSP. Por outro lado, ao biocarvão reduziu a umidade e aumentou a RMSP ao longo do perfil. De acordo com o limite crítico de 2,5 MPa, estabelecido por Dexter (2004), acima do qual já há restrição ao crescimento de raízes, a presença do lodo aumenta as chances de bom desenvolvimento radicular. O mesmo não foi observado para o biocarvão, o qual elevou ainda mais a RMSP. No solo controle, a restrição ao crescimento radicular já se inicia na profundidade de 10 cm, e para o biocarvão, essa restrição é ainda mais superficial, antes dos 10 cm. O solo com lodo apresentou menor resistência, porém com umidade acima de 20%.

ÁREA 4	Areia	Argila	Silte	Classe textural
0.00-0.10	87.57	1.92	10.50	Areia
0.10-0.20	85.85	3.28	10.85	Areia franca
0.20-0.30	83.02	6.08	10.88	Areia franca

Tabela 6 – Textura do solo na área 4 do experimento.

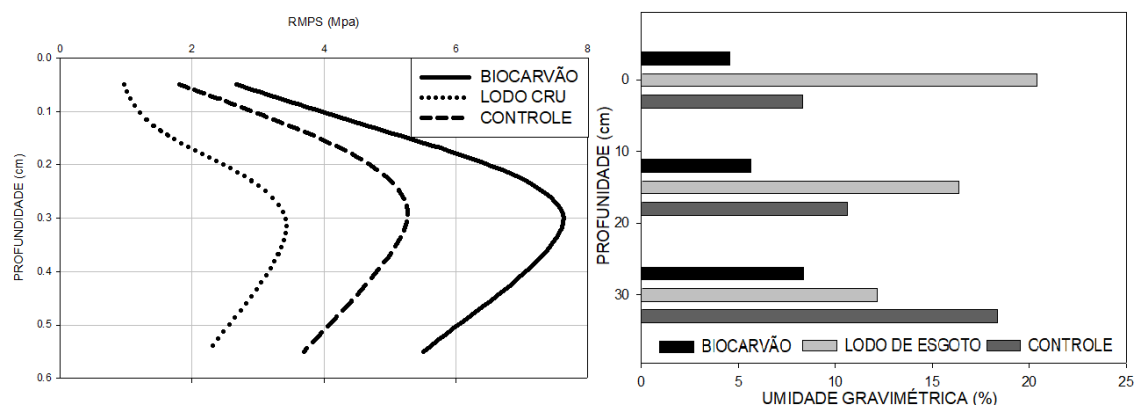


Figura 19 – Resistência mecânica a penetração e umidade no Argissolo Vermelho amarelo Distrofico típico na área experimental. São Cristóvão-SE, na área 4.

5.4 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

O intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo da área experimental está apresentado na Figura 20. Observa-se que o IHO coincidiu com o intervalo de água disponível em todos os tratamentos, ou seja, não houve restrição nem com relação à RMSP nem com a aeração do solo. O intervalo hídrico ótimo vem demonstrando ser promissor na avaliação da qualidade dos solos, visto que qualquer atividade realizada no solo causa mudanças em características físico-hídricas. Considerando-se as limitações agrícolas dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, qualquer interferência de uso e de manejo desses solos, no sentido de aumentar a produtividade das culturas, deverá passar necessariamente pela melhoria da qualidade física do solo e de suas condições químicas (DIAS et al., 2016).

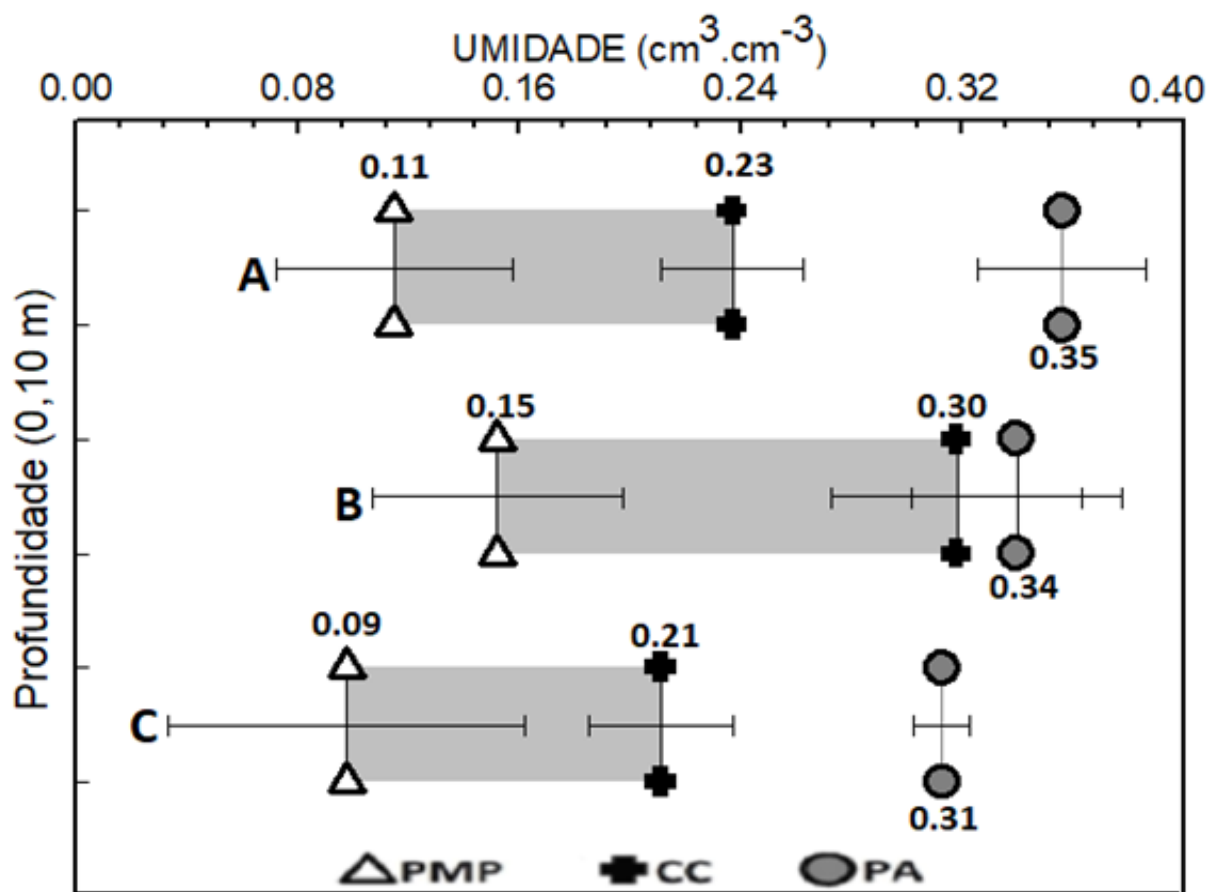


Figura 20 - Intervalo Hídrico Ótimo do Argissolo Vermelho amarelo Distrofico típico, na camada de 0-10 cm, após tratamento com biocarvão de lodo (A), lodo cru (B) e controle (C). São Cristóvão, SE. CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; PA: porosidade de aeração.

O IHO define a faixa de umidade do solo em que são mínimas as restrições físicas ao crescimento das plantas (MIOLA et al., 2015) e vem ganhando espaço por usar vários parâmetros para se determinar o grau de qualidade do solo para o desenvolvimento da cultura, tendo como limite superior a capacidade de campo (CC) e a porosidade de aeração (PA). A PA é a umidade volumétrica do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (10%). Para os limites inferiores, tem-se a resistência à penetração, onde umidade volumétrica quando a resistência do solo a penetração é maior ou igual a 2000 kPa, e o ponto de murcha permanente, onde a planta não retira mais água do solo.

Foi determinado o IHO para a camada de 0-10 cm, pois foi a camada na qual se adicionou o biocarvão e lodo de esgoto cru, e foi observado sua ação principalmente na camada de solo a qual sofreu maior desgaste pelas ações antrópicas e naturais. Dessa maneira, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e de manejo sobre a degradação da qualidade

física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras dessas modificações (DIAS et al., 2016).

Para um solo bem estruturado, temos o IHO coincidente com CC e PMP (semelhante a Água Disponível). Para essa camada, a RPL não acusou restrição para o desenvolvimento da cultura, sendo 1200 kPa o valor mais alto observado, o qual é bem inferior ao limite de 2000 kPa tido como valor crítico. SILVA et al. (2016), trabalhando em perímetro irrigado em Sergipe, encontraram valores de IHO igual à água disponível em solos com cultura da pimenteira e do maracujazeiro.

Por se tratar de um horizonte arenoso, pode-se inferir que a resistência mecânica à penetração não é o fator limitante ao desenvolvimento de raízes nos primeiros 0,2 m, e sim a disponibilidade de água (PACHECO & CANTALICE, 2011). As demais áreas ficaram abaixo dos 1000 kPa, já demonstrando que mesmo em pouco tempo os condicionadores agiram no solo de forma positiva, interagindo e melhorando os parâmetros de desenvolvimento para a planta. Assim, o valor inferior do IHO foi o PMP, que no caso do tratamento com lodo cru apresentou maior valor PMP, sugerindo que o material adsorve água a altas tensões, o que elevou a faixa de água disponível.

A diminuição do θ_{CC} e a do θ_{PMP} em razão do aumento da D_s pode estar associada à redução da distribuição do tamanho de poros desse solo (CARVALHO et al., 2015). Nenhuma das áreas apresentou valores expressivos para RPL, porém mesmo assim é notório que há uma correlação positiva com a densidade e negativa com a umidade do solo, como dito por CARVALHO et al. (2015) e Silva et al. (1994).

A porosidade de aeração (PA) não se apresentou em nenhuma área como sendo o limite superior, isso se dá por ser uma área antes já trabalhada, onde houve revolvimento do solo, assim a capacidade de campo (CC) foi o limite superior em todos os tratamentos. É nítido a variação da CC entre os tratamentos, aquele com maior aporte de matéria orgânica elevou em quase 45% a umidade do solo. Como o solo apresenta o seu limite superior a CC e inferior o PMP, diz-se que o IHO é igual a água disponível no solo (AD).

O lodo cru teve maior influência, sendo aproximadamente 40% superior ao controle, seguida do biocarvão. As plantas do café apresentaram bom desenvolvimento, mesmo com a baixa taxa de aplicação de resíduos, apenas 20 ton/hectares, metade do reportado em outros trabalhos científicos. Acredita-se que em doses maiores poderá haver uma elevação mais perceptível com os dois condicionadores.

A aplicação de lodo cru elevou a faixa de água disponível em função da matéria orgânica, que além de auxiliar na agregação do solo, funciona como uma esponja, absorvendo

elevaa quantidade de água. Esse comportamento se assemelha com plantios de consórcio onde as plantas com diferentes tipos de sistema radicular contribuem para a presença de poros biológicos após sua senescência.

Pacheco et al. (2011) encontraram maiores valores para a umidade na capacidade de campo em solo de mata com relação à áreas cultivadas. Por apresentar maior quantidade de matéria orgânica em decomposição, esse solo de mata também apresentou maior θ_{pmp} (PACHECO et al., 2011). No presente estudo, além da matéria orgânica do lodo cru, há também a contribuição dos resíduos vegetais da cultura da bananeira.

A porosidade de aeração crítica de 10% tem sido adotada como mínima para uma adequada difusão de oxigênio no solo, e não há resultados indicando valores mais consistentes, apesar de ser a variação tolerada variável entre diferentes espécies de plantas (Tormena et al., 1998). Se o solo em questão apresentar camadas coesas em profundidade ou logo abaixo da camada, isto ocasionará dificuldade de infiltração, assim a água acumula em superfície prejudicando a aeração em camadas superiores. Ambos os processos estão intimamente ligados à distribuição dos poros do solo, a constar os microporos, que são os poros responsáveis pelo armazenamento da água que será aproveitada pelas plantas (KLEIN; KLEIN, 2015).

O intervalo hídrico ótimo mais baixo foi o do solo controle, letra C, o qual não recebeu adição de resíduos de lodo, porém, vale ressaltar que nesse solo houve aporte de MOS advindo dos resíduos da cultura da bananeira. Dias et al. (2016) ao citar Silva et al. (1994) afirmam que o crescimento de culturas sobre solos que têm uma estreita faixa de IHO é mais vulnerável à seca e ao excesso de umidade do que sobre solos que têm um amplo IHO, resultado esse observado em vários parâmetros fisiológicos da cultura do café, onde a área controle sempre esteve abaixo das áreas onde houve adição de condicionadores de solo.

Esse risco de estresse para a planta pode ser mais agravado em regiões de baixa pluviosidade, ocorrência de veranicos que afetam a planta, principalmente em épocas de maior demanda hídrica, como no caso de enchimento de grãos. A diminuição do θ_{CC} e a do θ_{PMP} em razão do aumento da D_s pode estar associada à redução da distribuição do tamanho de poros desse solo (CARVALHO et al., 2015). Neste solo, houve o menor valor da porosidade de aeração, isso se dá pela densidade mais acentuada que os demais solos, como é relatado por Tormena et al. (1998), à medida que aumenta a resistência à penetração há um decréscimo na porosidade de aeração.

Martins et al. (2006) observaram que o cafeeiro é afetado pela seca, com consequente redução da produção. Estes mesmos autores relatam que a utilização de práticas agrícolas de

conservação da umidade do solo ou de irrigação pode ser uma forma de mitigar os problemas de deficiência hídrica e de incremento de produção. A determinação do PMP e CC como fatores limitantes é algo que já precisa ser revisto, pois não somente estes fatores estão retratando a boa condição de desenvolvimento da planta, mas também outras variáveis como solo e clima. A quantidade e época em que ocorrem as precipitações são informações importantes.

De acordo com Tormena et al. (1998), o aumento da densidade do solo implica em redução do IHO. O solo com biocarvão e lodo de esgoto apresentaram baixa densidade do solo, semelhante ao trabalho conduzido por Partelli et al. (2011), os quais aplicaram esterco bovino e turfa líquida em um solo e, após 8 anos, ainda verificaram resultado positivo como bio condicionadores do solo. Tanto o biocarvão como o lodo de esgoto demonstraram alterações positivas na qualidade do solo (SUN; LU, 2014).

5.5 Retenção de água no solo pelo método do funil

A capacidade de retenção de água do Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico tratado com resíduos orgânicos está apresentada na Figura 21. Os valores de CRA variaram de 26,4% a 37,8% na camada de 0-10 cm e de 25,8% a 30,4% na camada de 10-20 cm. Independente da forma de aplicação, ou seja, carbonizado ou não, a aplicação de lodo de esgoto aumentou em aproximadamente 40% e 18% a CRA nas camadas de 0-10 cm e de 10-20 cm, respectivamente. O maior incremento na camada superficial deve-se à aplicação dos resíduos diretamente nessa camada de solo, ao passo em que o aumento na camada subsuperficial deve-se, provavelmente, à translocação de dos resíduos da superfície para maiores profundidades ao longo do perfil. Isso demonstra que, apesar da aplicação em superfície, o efeito desse material alcança camadas do solo.

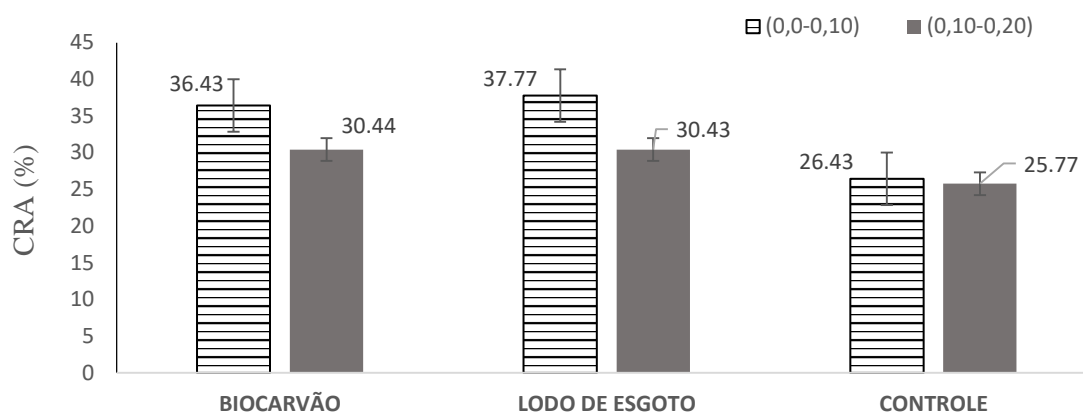


Figura 21 – Capacidade de retenção de água (CRA) no Argissolo Vermelho amarelo Distrofico típico após um ano de aplicação dos resíduos. São Cristóvão, SE.

É importante salientar que, apesar da expectativa de aumento da porosidade e da área superficial após a carbonização, o uso de biocarvão não diferiu do lodo de esgoto cru com relação à CRA. Isso se dá pela origem do material que deu origem ao biocarvão, como o lodo já é uma forma bem degradada, e decomposição avançada. Porém se tivesse sido com outro material, a exemplo de aparas de gramas ou palha de milho, poderia ter resultados mais destacáveis. Resultado assim encontrado por Sum e Lu, 2014 que explicam seus resultados que possível explicação para o aumento da retenção de água nos solos modificados por biocarvão de palha envolve a presença de água tanto no interior dos poros biocáridos quanto entre partículas de biocarvão, como resultado das forças capilares e / ou atração de água para as superfícies externas do biocarvão.

A capacidade de retenção de água no solo determinada pelo método do funil representa uma alternativa interessante pela rapidez do procedimento e pelo baixo custo, podendo ser usado facilmente para demonstrações em campo junto aos produtores rurais, principalmente para solos arenosos, com maior sensibilidade aos potenciais matriciais empregados nos equipamentos de laboratório, como foi observado no presente estudo, onde os efeitos dos resíduos puderam ser observados com maior facilidade quando comparados aos resultados da retenção de água determinada no aparelho de pressão de Richard. Assim, os resultados da CRA tendem a se aproximar da umidade observada na capacidade de campo.

A retenção de água no solo é influenciada pela prática de manejo adotada, passagem de máquinas ou pisoteio de pessoas, tempo de adição de matéria orgânica ou tratos no solo em uma área. O resultado da figura 21, mesmo após um período de aproximadamente 3 anos após a adição desse material, mostra o efeito duradouro dos resíduos no solo.

Como foi observado na curva de retenção de água (Figura 11), a adição dos resíduos aumentou a quantidade de água retida no solo, o que deve estar associado aos maiores teores de matéria orgânica no solo. Sum e Lu 2014, em seu trabalho com biocarvão de diferentes fontes fala que o Teor de água disponível foi variável para diferentes tipos de biochar, entre eles o lodo de esgoto. Eles ainda dizem que o biocarvão de palha tem a condição de aumentar a capacidade de água disponível dos solos, e potencial de aumentar o rendimento das culturas quando as culturas foram expostas à água estresse em um Vertissolo, porém nenhum efeito de biocarvão de cavacos de madeira ou lodo de esgoto na quantidade de água retido por solos no equilíbrio drenado pela gravidade. Sendo de resultados diferentes ao deste estudo, isso se dá pelo tipo de solo por Sum e Lu, 2014 ser um solo com maior teor de argila e solo trabalhado para a dissertação ser mais arenoso, isso demonstra que cada matéria prima dá ao biocarvão características distintas.

Foi observado um aumento na retenção de água no solo na faixa 38% superior ao controle, resultado na incrementação já esperado, porém não tão alto como resultado de LIU et al. (2017) que teve um incremento de 127% para a água disponível com biocarvão biochar mais grosso com areia. O carvão, devido à sua porosidade, e consequentemente à sua grande superfície específica, pode aumentar significativamente a capacidade de retenção de água, especialmente em solos de textura arenosa (JUNIOR, 2017). Resultados mais expressivos podem ser encontrados se ao longo dos anos forem sendo incorporadas novas quantidades de biocarvão, visto que o volume trabalhado foi de apenas 20 t ha⁻¹.

Para a camada de 0,10-0,20 m, resultados positivos também foram encontrados, pois o biocarvão atuou até em camadas mais profundas, tendo um aumento na capacidade de retenção de 18,12% esses resultados podem se dar na melhoria da estrutura do solo, aumento da presença de microrganismos os quais se desenvolvem graças à presença do biocarvão, fornecendo material para ser digerido ou mesmo um ambiente de alojamento dessa pequena fauna. Esses resultados vão além, pois essa maior umidade também auxilia na redução da resistência do solo ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas. O biocarvão de palha tem maior volume de poros e mais meso e macroporos enquanto o biocarvão de lodo de esgoto e cavacos de madeira são dominados por micro e pequenos poros que não são para armazenar a água disponível para as plantas (Sum e Lu, 2014).

Para o lodo de esgoto, resultados demonstram haver efeito positivo mesmo após um bom período de adição ao solo, com resultados bem satisfatórios. Na profundidade de 0-0,10m, foram encontrados valores 43% maiores comparados com o solo controle, assim reafirmando suas propriedades promissoras como condicionador do solo, e bons resultados *in*

situ, afirmando em situação de campo o que já se vinha sendo demonstrado em situações controladas de laboratório. Semelhante ao biocarvão, este tratamento influenciou em profundidades onde não se havia feito a incorporação, com valores iguais praticamente com 19% maior volume retido que o solo tido como referência.

Ulyett et al. (2014), trabalhando em solo de textura franco-arenoso, semelhante às condições do presente trabalho, obtiveram resultados semelhantes com redução da densidade e aumento da retenção de água do solo, os autores atribuem seus resultados à natureza porosa do biocarvão, aumentando a retenção geral de água. Sum & Lu observou em seu trabalho que biocarvão de palha tem maior volume de poros e mais meso e macroporos enquanto o biocarvão de lodo de esgoto e biocarvão de cavacos de madeira são dominados por micro e pequenas poros que não são para armazenar a água disponível para as plantas. Comportamento também observado no biocarvão de lodo na área do café.

A fase inicial de crescimento do cafeeiro no campo constitui um período crítico, pois, a baixa umidade do solo pode provocar um retardo no crescimento das plantas, além de ocorrência de muitas falhas nas lavouras, o que pode comprometer o sucesso da cafeicultura (MARTINS et al., 2006). O desenvolvimento radicular em períodos de veranicos pode ser prejudicado e gerar estresse à planta. Assim, essa maior capacidade de retenção influencia muito além da capacidade de fornecer água, mas também no desenvolvimento do sistema radicular de forma satisfatória, não prejudicando sua estrutura fisiológica.

Dessa forma, tanto o biocarvão de lodo de esgoto, como o lodo de esgoto cru tem influência não apenas no aspecto físico do solo, mas em uma gama de propriedades que, no geral, proporciona maior rendimento e menor custo para o produtor. Plantas mais vistosas e com maior capacidade de produzir são apenas parte dos benefícios da aplicação desses materiais no solo.

5.6 Umidade do solo ao longo do tempo (ARDUINO UNO E DIVINER 2000)

A cafeicultura tem potencial para se instalar em regiões de baixa precipitação ou veranicos, porém deve existir adequado fornecimento de água durante o ciclo da cultura.

Manter um conteúdo de água no solo adequado para o desenvolvimento das plantas é difícil sem um monitoramento em tempo real e, assim, é necessário o uso de equipamentos que forneçam medidas precisas a um custo razoável (RAMOS et al., 2014). Para avaliação do conteúdo de água no solo da área experimental, foram instalados sensores de umidade do solo,

leitura, em uma escala temporal de 10 minutos de uma leitura para outra. Por questões práticas de manejo do equipamento, houve alguns erros de leitura. Outro fator importante na sonda de umidade Arduino que foi proposta foi a baixa duração das baterias, as quais, a princípio, eram estimadas para terem duração de 24 horas, e após isso, uma pausa de 24 horas para recarregar as baterias, porém elas duravam apenas 5 horas em média, bem abaixo do esperado.

Mesmo assim, foi possível a obtenção de resultados. Devido à irregularidade na irrigação, como entupimento dos gotejadores e falhas nas tubulações devido a furos e rompimentos, a distribuição da água não foi uniforme na área experimental, fato que comprometeu os resultados.



Figura 22 – instalação em campo das sondas feitas com Arduino. São Cristóvão, SE.

As leituras no sensor Arduino foram realizadas em pontos próximos aos tubos da sonda DIVINER, principalmente pelo caráter exploratório e experimental do uso da sonda Arduino. Dessa forma, as avaliações feitas com o Arduino poderiam ser comparadas com as

leituras da sonda Diviner. Os resultados obtidos com a sonda Arduino estão apresentados na Figura 23 e mostram que o solo do tratamento sem resíduos (controle) permanece úmido por maiores períodos de tempo.

Este solo possui densidade mais elevada em comparação aos demais solos, assim, os microporos se mantêm com água por um período maior, maior dificuldade de infiltração da água no solo, sendo mais lenta a passagem do volume de água lançado em superfície para camadas mais profundas; esse resultado está associado à maior resistência à penetração em profundidade. Resultado descrito por PRIMO et al. (2015), usando uma sonda DIVINER 2000 em Argissolo Vermelho Amarelo, no semiárido, mostrou que há uma tendência de redução da condutividade hidráulica do solo saturado com a profundidade.

Em função da maior capacidade de infiltração de água na área com biocarvão, pôde-se observar aumento da umidade em profundidade, mas até os 30 cm, onde possivelmente a camada coesa limitou a drenagem.

Valores de umidade mais baixos foram observados em alguns períodos no solo tratado com lodo de esgoto, como indicado nas duas profundidades observadas pelas sondas de umidade do Arduino. Como o lodo apresenta um efeito esponja, absorvendo grande volume de água, era esperado um resultado diferente. Porém, considerando que na área com lodo a densidade do solo foi menor, possivelmente houve maior evaporação da água, tendo em vista o caráter arenoso desse solo.

Outro fato que pode ter ocorrido foi maior percolação da água a través do perfil, já na área de lodo cru não foi detectada a presença da camada coesa, assim a água penetra no solo com maior facilidade, auxiliando assim na queda mais notável para este tratamento. Por se tratar de um horizonte arenoso, pode-se inferir que a resistência mecânica à penetração não é o fator limitante ao desenvolvimento de raízes nos primeiros 0,2 m, e sim a disponibilidade de água (PACHECO et al., 2011).

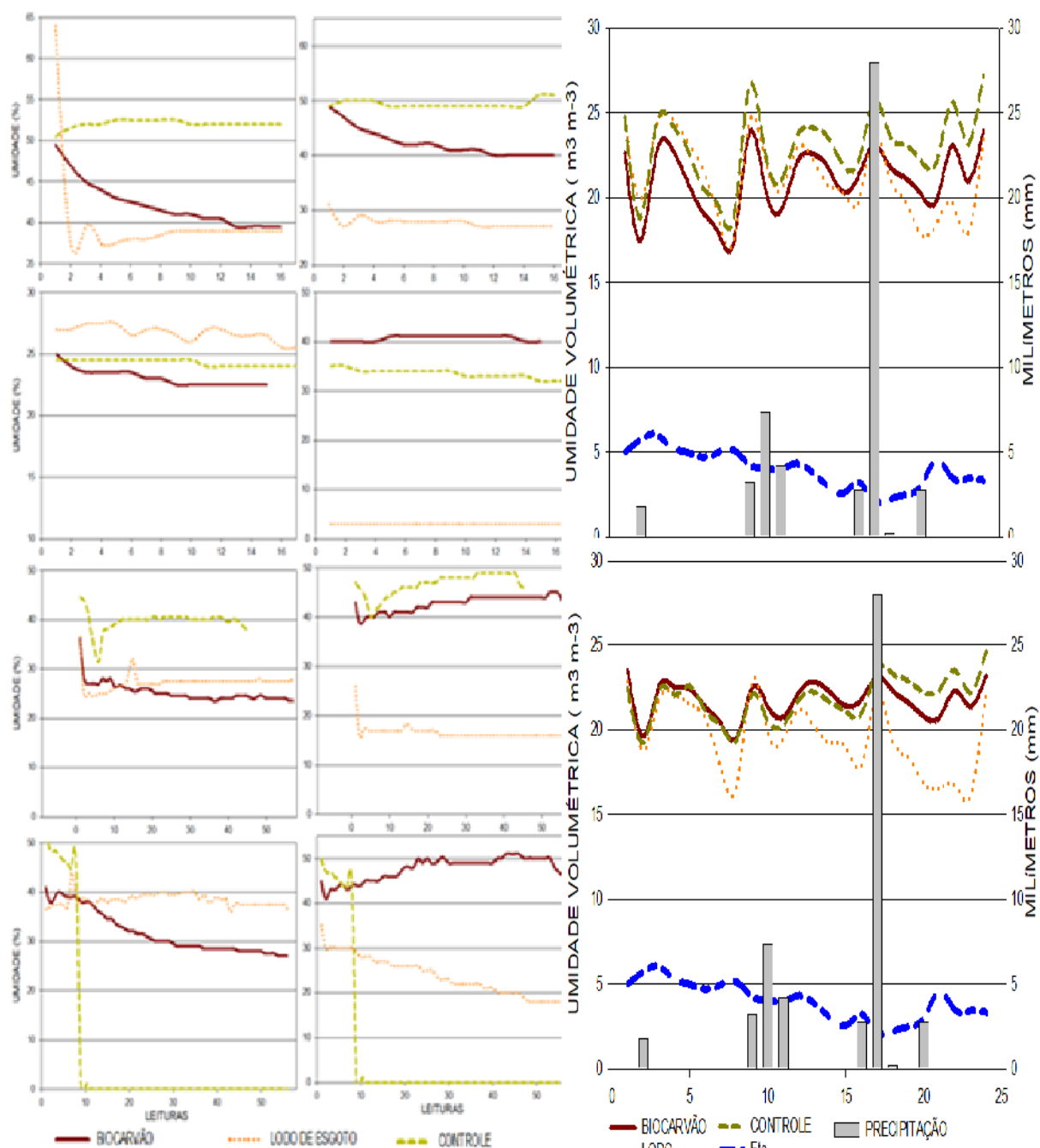


Figura 23 – Umidade do solo com a sonda de haste do Arduino (esquerda) e com a sonda DIVINER (direita) na área 2 do café.

Apesar das diferenças na área experimental, o uso do sensor arduíno conseguiu semelhança com os resultados da sonda Diviner, onde o controle sempre mostrou valores pouco maiores que o biocarvão, e o solo com lodo cru, na maioria das vezes, sempre mostrou valores de umidade abaixo do solo controle.

A Figura 24 apresenta os resultados de umidade obtidos com o uso da Sonda Diviner

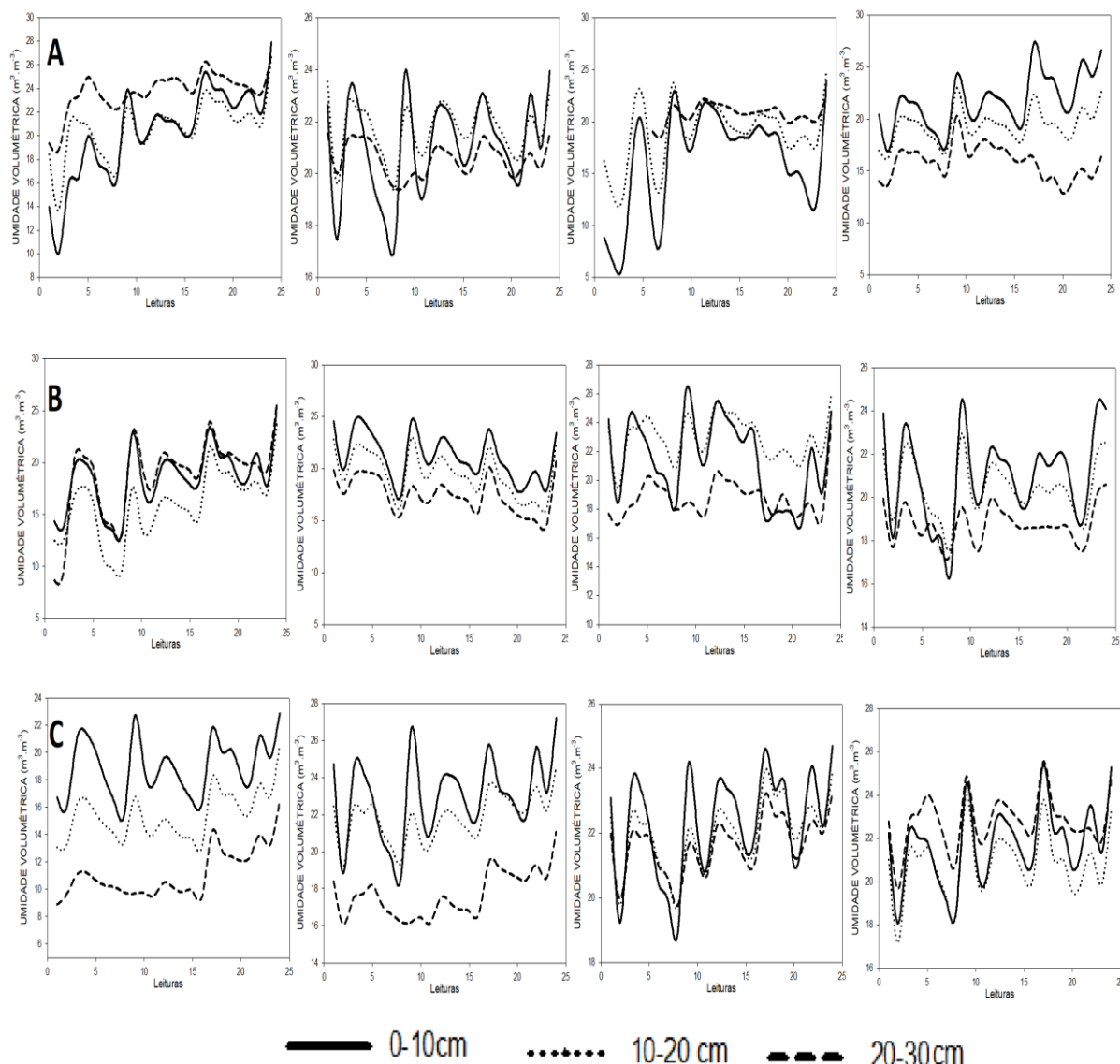


Figura 24 – Umidade do solo ao longo do tempo, obtida através da sonda Diviner. A: biocarvão, B: lodo de esgoto, C: controle. Para cada tratamento, são apresentadas 4 repetições. Sendo 4 tubos para cada tratamento, cada tubo para as 4 áreas respectivamente.

A sonda Diviner é usada amplamente em pesquisas para determinação do conteúdo de água no solo. Para emitir o resultado do conteúdo de água no solo (θ), o sensor leva em consideração aspectos relacionados com a topografia, propriedades físicas do solo, cobertura vegetal e condições meteorológicas locais (TORRES et al., 2015). As leituras com a sonda demonstraram um comportamento inesperado, onde o solo controle apresentou, na maioria dos casos, valores mais elevados de água, principalmente na primeira camada de solo. Ramos et al. (2014) encontraram, em seu trabalho com a sonda DIVINER, correlação negativa entre a densidade e macroporos, corroborando com os resultados encontrados no presente trabalho.

Na Figura 25, pode-se observar os resultados médios da umidade do solo obtidos através da sonda Diviner para cada tratamento. Até a profundidade de 0,30 m o solo controle

apresentou maiores teores de umidade. Li et al. (2013) explicaram que, por haver uma camada de impedimento em profundidade, as camadas subjacentes apresentam maior armazenamento de água; adicionalmente, valores mais elevados de densidade do solo também podem justificar esse resultado, como afirmam Tormena et al. (1998) e Pacheco et al. (2011), os quais encontraram resultados semelhantes em seus estudos. Segundo os autores, maior densidade influenciou na retenção de água, na porosidade total e na distribuição dos tamanhos dos poros, e que até certo ponto, alguma compressão pode gerar efeito positivo.

O conteúdo de água no solo (θ) também é utilizada em uma das etapas mais importantes, a estimativa do fluxo vertical de água no solo (Q) (TORRES et al., 2015). Herath et al. (2013) reportam que os efeitos globais das alterações orgânicas em solos podem ter implicações positivas se a aeração for aumentada em solos mal drenados, e que a extensão desse benefício sempre dependerá de como a camada de solo abaixo do solo modificado responde à drenagem.

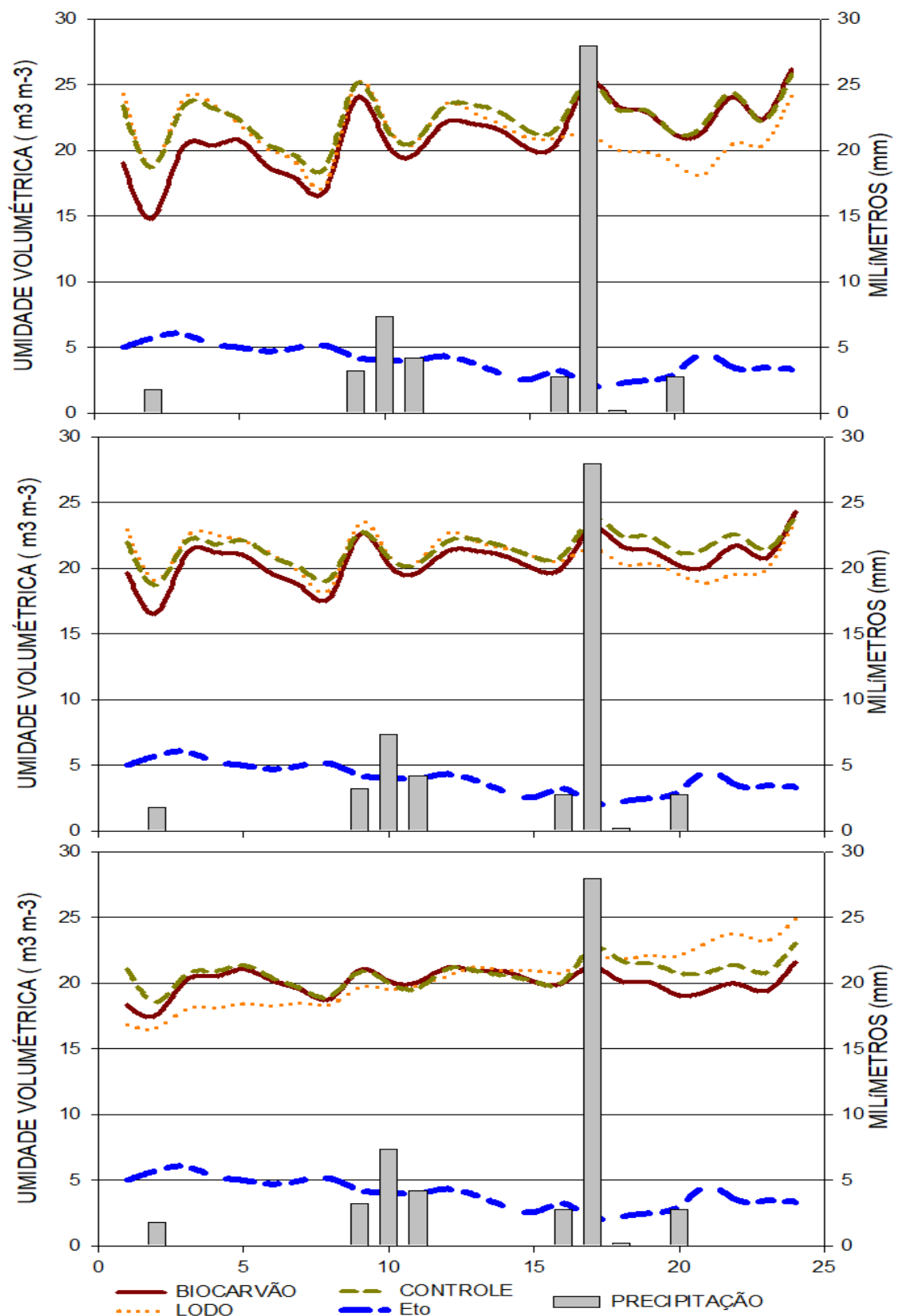


Figura 25 – Valores médios de umidade do solo, de evapotranspiração de referência e de precipitação na área experimental. A: 0-0,10 m; B: 0,10-0,20 m; C: 0,20-0,30. São Cristóvão-SE.

As modificações provocadas pelo revolvimento na estrutura, distribuição do tamanho dos poros e teor de carbono orgânico alteram as forças de retenção de água no solo e sua disponibilidade, os quais são fatores determinantes para o desenvolvimento de plantas em sistemas não irrigados (SILVA et al., 2005). Biocarvão de palha e de lodo melhorou a formação de macroagregados (5–2mm) e diminuiu a quantidade de microagregados (< 0.25 mm), mantendo assim a porosidade e diminuindo o risco de vedação da superfície (Sum e Lu, 2014).

Ao contrário do que ocorre em áreas sob plantio, onde a matéria orgânica fica em superfície e protege o solo da incidência dos raios solares, a matéria orgânica adicionada e incorporada, como no presente estudo, aumentou os macroporos, permitindo a infiltração e o armazenamento de água no solo, porém pode ter havido também elevada evaporação pela ação direta da evapotranspiração, comportamento de perda de água que pode ter sido acelerado pelas características do solo, somado ao fato que eram feitas limpezas nas linhas de cultivo e o solo ficava desprotegido.

Enquanto a microporosidade e a mesoporosidade são primordialmente importantes em reter água disponível no solo, a macroporosidade influencia na condutividade hidráulica e aeração do solo (HERATH; CAMPS-ARBESTIAN; HEDLEY, 2013). Para o biocarvão, a condição de maior ou menor porosidade se dá pelo material de origem. A estrutura dos biocarvões é determinada pela heterogênea natureza da biomassa original e da natureza da pirólise que ocorre durante a oxidação com baixo teor de oxigênio.

O armazenamento de água no solo depende do tamanho e quantidade de poros, principalmente dos microporos (SILVA, et al., 2016). Mudanças significativas na estabilidade dos agregados do solo, retenção de água, distribuição de poros por tamanho foram observados após a adição de biochar a um solo argiloso (Sum e Lu, 2014).

5.7 Avaliação do crescimento e da produtividade do café conilon na área experimental

Os resultados da avaliação do cafeeiro submetido ao manejo com biocarvão e lodo de esgoto estão apresentados na Figura 26. O diâmetro do caule e da copa e a altura da planta não foram influenciados pela presença de biocarvão de lodo de esgoto. Já a aplicação de lodo cru aumentou a altura das plantas, o diâmetro do caule e a produtividade de grãos em 75%.

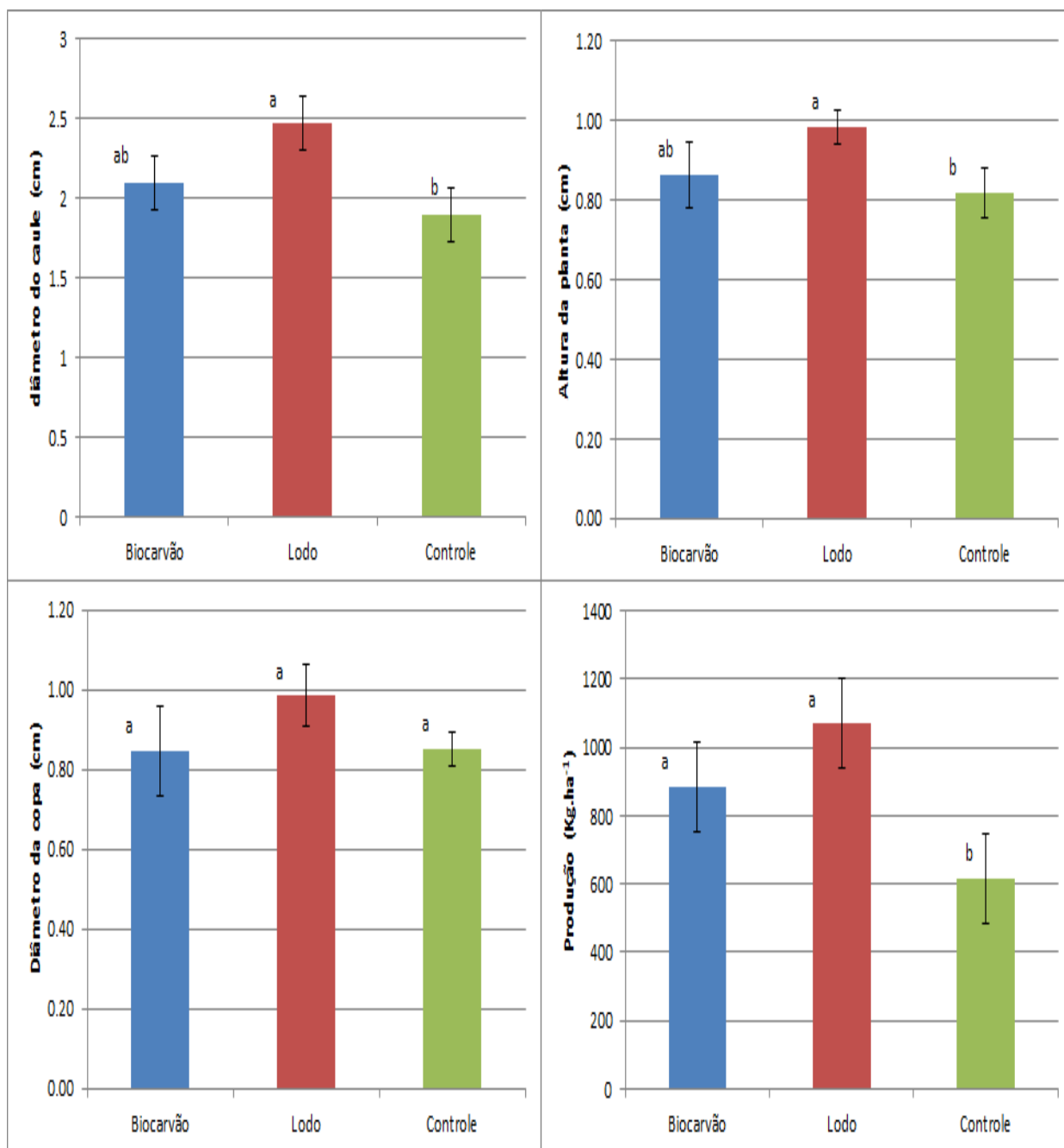


Figura 26 – Altura, diâmetro do caule e produtividade das plantas de café conilon na área experimental. São Cristóvão, SE.

Apesar de não ter influenciado nos parâmetros de crescimento das plantas, o biocarvão aumentou a produtividade do cafeeiro em 50%, uma margem considerável de ganho por área. O biocarvão é uma forma de carbono resistente à decomposição e sua aplicação ao solo promove melhorias em atributos físicos, químicos e biológicos, com consequências positivas para as culturas (SIGNOR; DEON, 2017).

A adição de biochar ao solo melhora a sua fertilidade e induz o rendimento das culturas nos solos agrícolas (SILVA et al., 2017), pois também estimula os organismos do

solo que consequentemente levam a um aumento da reciclagem de nutrientes dos resíduos de biomassa, como na área do café. Isso se dá pelo aporte de nutriente e matéria orgânica fornecido, que auxilia em um melhor condicionamento do solo.

Esse comportamento já foi observado até mesmo em culturas de ciclos curto, pois sabe-se que é necessário um período de interação entre o biochar e o solo. Sousa et al. (2015) reportaram resultados positivos na melhoria da fertilidade do solo e na absorção de nutrientes pela cultura do rabanete após aplicação de biocarvão de lodo. Os autores observaram melhorias no número de folhas, comprimento de folhas, altura da planta e massa seca da parte aérea para a aplicação de biochar na faixa de 20 a 60 Mg ha⁻¹. SILVA et al., (2017) afirmam que a adição de biochar ao solo melhorou sua fertilidade e o rendimento das culturas nos solos agrícolas.

O crescimento das plantas resulta de interações envolvendo carboidratos, hormônios, água e minerais (PAIVA et al., 2003). Altura das plantas é fator que também é primordial, sendo que plantas com maiores alturas apresentam maior quantidade de ramos laterais produtivos, o porte da planta influencia de modo geral em toda sua estrutura, pois plantas mais desenvolvidas absorvem maior radiação, e devem apresentar sistema radicular maior, com maior capacidade de absorção de nutrientes, ainda mais em período produtivo, onde o consumo é maior, e um conjunto todo equilibrado gera até mesmo plantas mais saudáveis e capacidade de suportar tempos de estresse hídrico, podas ou outros.

As plantas com tratamento com lodo de esgoto apresentaram altura superior, com 0,98 cm aproximadamente, 20% a mais comparado ao tratamento controle. O fator mais visado pelo produtor é a produtividade, o que realmente pode dar-lhe maior rendimento por hectare, com redução no custo de adubação nitrogenada. Portanto, no presente trabalho, a adição de biocarvão e lodo de esgoto atendeu essa expectativa, o que é confirmado em outros trabalhos onde biocarvão e lodo foram utilizados como condicionadores e insumos. Atkinson et al. (2010) também observaram o potencial do biocarvão para melhorar a produtividade da planta.

A análise da produção de grãos de café na Figura 26 mostra que a carbonização do lodo não interfere com sua capacidade como melhorador do solo, pois o biocarvão de lodo produziu o mesmo efeito na cultura do café. A vantagem de usar biocarvão ao invés de lodo é o tempo de permanência maior do biocarvão no solo, além da eliminação de agentes patogênicos. A pequena vantagem apresentada pelo lodo, mostrada pela estatística como insignificante, pode estar associada ao fornecimento imediato de nutrientes, presentes no lodo de forma mais disponível ou liberados mediante decomposição da matéria orgânica, que ocorre de forma mais rápida do que no biocarvão.

Com isso, a capacidade produtiva do solo potencialmente aumenta, implicando em maior produção de biomassa vegetal e produtividade (PETTER et al., 2016). Devido à baixa C/N do lodo, a decomposição da matéria orgânica é rápida. Isto reforça a recomendação de que a aplicação de lodo no solo deve ser contínua para manter os níveis de matéria orgânica (MARTINS et al., 2015). A Figura 27, retirada do trabalho de Costa et al. (2018), mostra que a dose de lodo de esgoto usada no presente estudo (20 t ha^{-1}) não foi adequada para elevar a produtividade do café conilon. No trabalho dos autores, doses maiores resultaram em melhores produtividades de café arábica. Isso sugere que futuras pesquisas devem ser realizadas incluindo doses mais elevadas de biocarvão de lodo.

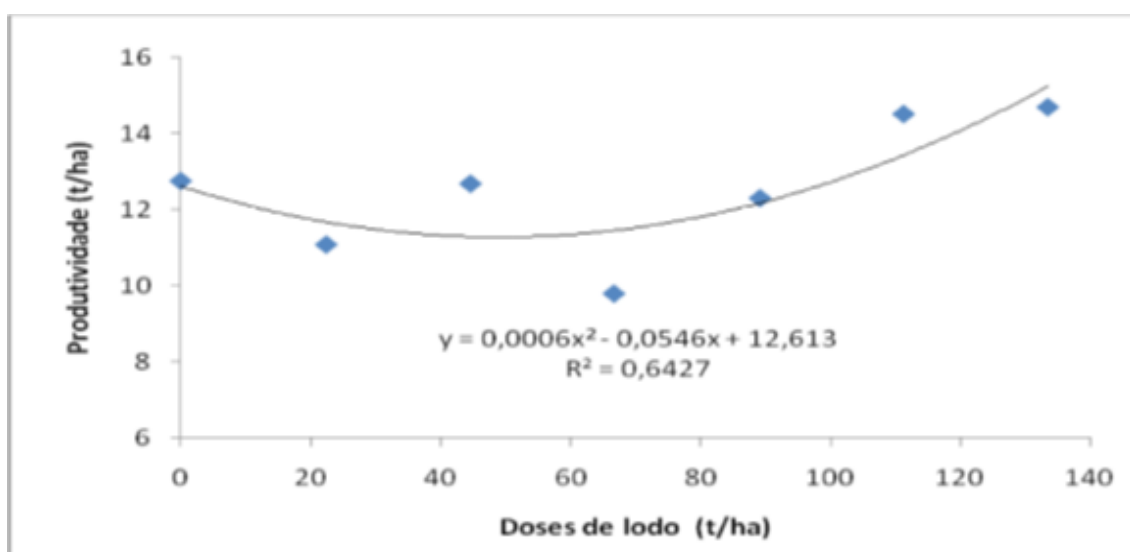


Figura 27: Produtividade do café arábica (T/ha) nos diferentes tratamentos com lodo de ETE calcado. (Fonte: COSTA, A. et al.,2018).

Essa melhoria na produção traz inúmeros benefícios ao meio ambiente, pois intensificando a produtividade na área já ocupada pela agricultura reduz o desmatamento, e a necessidade de incorporação de novas áreas ao processo produtivo. Assim, áreas florestais serão preservadas e manterão sua função ecológica; nessa mesma linha, os resíduos produzidos nas estações de tratamento de efluentes terão um destino ecológico adequado, pois não serão lançados inadequadamente no ambiente, podendo poluir solo, cursos d'água e lenções freáticos. E por fim, uma produção sustentável onde o produtor terá redução dos custos de produção, elevação da margem de lucro pois tem redução no uso de insumos, além de ter um mercado mais aberto e preços mais elevados por serem produtos de uso sustentável.

5.8 Avaliação visual da biota do solo na área experimental

Apesar de não ter sido a proposta do presente trabalho, vale a pena registrar as observações feitas em campo durante a condução do experimento, para mostrar que, além dos

benefícios às propriedades físicas do solo, a presença de biocarvão e mesmo de lodo de esgoto alteraram de forma positiva a biota do solo, fato que pode ser observado na Figura 28. Considerando que o solo da área experimental é sujeito à práticas de cultivo convencional há muitos anos, pouco ou nenhum sinal de macroorganismos foi observado no solo controle. A reduzida presença de matéria orgânica no solo reduz os níveis da atividade microbiana e da macrofauna, com implicações no crescimento da vegetação (BARBOSA; FILHO, 2006).

O contrário foi observado no tratamento com lodo de esgoto e mais ainda onde foi aplicado o biocarvão de lodo. A presença de minhocas, como mostra a Figura 28, no solo com biocarvão, auxilia na melhoria do solo e ajuda a degradar compostos e facilitar o fornecimento de nutrientes as plantas. Foi também verificado a presença de cupins em quantidade em locais onde o biocarvão foi aplicado. Apesar de simples observações, é interessante a forma como o biocarvão interage e estimula a biota do solo.

Essa matéria orgânica incorporada ao solo aumenta a permanência da matéria orgânica, dando maior proteção e reduzindo a degradação rápida da MOS e gerando um aumento gradativo na matéria orgânica presente no solo e o estoque de carbono. Uma característica física chave da maioria dos biocarvões é sua estrutura altamente porosa e grande área de superfície (HERATH; CAMPS-ARBESTIAN; HEDLEY, 2013), estes mesmos autores ainda falam que essas estruturas fornecem refúgio para microorganismos benéficos ao solo, como micorrizas, as quais em associação com a planta aumentam a área de absorção de água e nutrientes, e ainda as bactérias, estas podem auxiliar no fornecimento de macronutrientes tais como N e P.



Figura 28 – Presença de macrorganismos no solo com tratamentos, aporte de matéria orgânica pela planta do café.

Estes organismos que ajudam a ciclar e melhora o aporte de nutrientes, agregar e geram novos poros, como as minhocas que auxiliam na infiltração e geram rotas mais praticas para o sistema radicular da cultura empregada. Esses microrganismos presentes, ou o seu retorno pós a adição de biocarvão, pode auxiliar na movimentação desde componente para camadas mais profundas (HERATH; CAMPS-ARBESTIAN; HEDLEY, 2013) comportamento este observado nos testes de retenção de água ao solo, onde apenas as propriedades físico-hídricas que exercem influência nestas propriedades.

6 – CONCLUSÕES

1. Os tratamentos empregados apresentaram resultados satisfatórios, ou seja, melhoraram a estrutura do solo, ainda que de forma discreta em função da baixa dose aplicada, e aumentaram a produtividade do cafeeiro;
2. O lodo de esgoto promoveu melhores resultados na porosidade, na densidade e na retenção de água no solo com relação ao biocarvão;
3. Em função do resultado de produtividade do cafeeiro ter sido similar nos tratamentos com lodo e biocarvão, e ambos melhores do que o controle, pode-se afirmar que o uso de biocarvão de lodo no Argissolo Vermelho amarelo Distrofíco típico é uma prática de manejo sustentável e sem riscos de contaminação microbiológica.
4. A falta de controle do sistema de irrigação da área experimental durante a condução do experimento prejudicou a obtenção de resultados mais realísticos e, portanto, mais satisfatórios, no presente estudo.

7 – REFERÊNCIAS

ABEL, Stefan et al. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013.

AGENCIA BRASIL – EBC: **Dia Mundial da Água: 78% dos empregos no mundo dependem de recursos hídricos**. <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-03/dia-mundial-da-agua-78-dos-empregos-no-mundo-dependem-de-recursos-hidricos>. ACESSO: 2017.

ALVES, MARLENE CRISTINA; SUZUKI, LUIS GUSTAVO AKIHIRO SANCHES; SUZUKI, LUIZ EDUARDO AKIYOSHI SANCHES. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 617-625, 2007.

ARRUDA, F. B.; GRANDE, M. A., **fator de resposta da produção do cafeeiro ao déficit hídrico em campinas**. *Bragantia*, v. 62, n. 1, 2003.

ATKINSON, CHRISTOPHER J.; FITZGERALD, JEAN D.; HIPPS, NEIL A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. **Plant and soil**, v. 337, n. 1-2, p. 1-18, 2010.

BARBOSA, G. M. C.; FILHO, J. T. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 4, 2006.

BASSO, Andres S. et al. Assessing potential of biochar for increasing water-holding capacity of sandy soils. **Gcb Bioenergy**, v. 5, n. 2, p. 132-143, 2013.

BETTIOL, WAGNER; DE CAMARGO, OTÁVIO A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. **Embrapa Meio Ambiente-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2000.

BLAINSKI, Everton et al. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 273-281, 2009.

BOLDRIN, M. T. N.; BOLDRIN, D. L. Estimativa da pegada hídrica do cultivo de soja em Mato Grosso. **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, v. 32, 2012.

BRASIL DIAS, Camila et al. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, 2016.

BRASIL, CONAMA. Resolução no 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução, n. 357**.

BRITTO, F. B. et al. Avaliação do risco de contaminação hídrica por agrotóxicos no Perímetro Irrigado Betume no Baixo Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 3, p. 158, 2015.

BRITTO, F. B. **Monitoramento e modelagem da qualidade da água e agrotóxico em corpos hídricos no baixo São Francisco Sergipe**. 2015. 165 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2015.

BRUUN, E. W. et al. Biochar amendment to coarse sandy subsoil improves root growth and increases water retention. **Soil Use and Management**, v. 30, n. 1, p. 109-118, 2014.

CARDOSO, R. TESTEZLAF1 EE MATSURA2 JL. **O PARADOXO DA IRRIGAÇÃO: PRODUZIR ALIMENTOS SEM CONSUMIR ÁGUA**. 2002.

MIOLA, Ezequiel Cesar et al. Intervalo hídrico ótimo em solo construído após mineração de carvão em diferentes limites críticos de resistência à penetração e umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, 2015.

CODEVASF - **Baixo São Francisco** <http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetros-irrigados/polos-de-desenvolvimento-1/baixo-sao-francisco> acesso: 03/07/2017.A

CODEVASF - **Codevasf projeta recorde de produtividade em perímetros do Baixo São Francisco sergipano**. <http://www.codevasf.gov.br/noticias/2015/codevasf-projeta-recorde-de-productividade-em-perimetros-do-baixo-sao-francisco-sergipano/> acesso em: 03/07/2017. B

CODEVASF - **Colheita de arroz em projetos sergipanos da Codevasf deve alcançar 30 mil toneladas** <http://www.codevasf.gov.br/noticias/2016/colheita-de-arroz-em-projetos-sergipanos-da-codevasf-deve-alcancar-30-mil-toneladas> ACESSO: 30/06/2017

CONSORCIO PESQUISA CAFÉ - **Lavouras dos Cafés do Brasil faturam R\$ 21 bilhões em 2017**. <http://www.consorcioquesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/847-2018-01-05-14-47-12> Acesso em: 10/01/2018.

COSTA, A. et al. Influência da aplicação de lodo de estação de tratamento de esgoto, tratado com cal virgem, na produtividade do café arábica. 2018.

COSTA, CARLA DEISIANE DE OLIVEIRA; ALVES, MARLENE CRISTINA; DE PÁDUA SOUSA, ANTÔNIO. armazenamento de água em dois solos sob diferentes usos e manejos. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 2, p. 55-65, 2016.

SILVA, Gualter Guenther Costa et al. **USO DO BIOCHAR PARA FINS AGRÍCOLAS: Principais vantagens**. 2017.

SILVA, Thiago Lima et al. Intervalo hídrico ótimo utilizado como indicador da qualidade física em perímetro irrigado. **Revista Agrogeambiental**, v. 8, n. 4, 2016.

MONTEIRO, Hélida Christine et al. Dinâmica de Decomposição e Mineralização de Nitrogênio em Função da Qualidade de Resíduos de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras1. **R. Bras. Zootec**, v. 31, n. 3, p. 1092-1102, 2002.

DIAS, C. B. et al. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, 2016.

DICKINSON, Dane et al. Cost-benefit analysis of using biochar to improve cereals agriculture. **Gcb Bioenergy**, v. 7, n. 4, p. 850-864, 2015.

NASCIMENTO SANTOS, José; PEREIRA, Ediléa Dutra. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. **Cadernos de Pesquisa**, 2013.

DOURADO-NETO, D. et al. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v.57, p. 191-192, 2000.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos e análise de solo**. Rio de Janeiro: 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documento, 1) 1997.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção brasileira de café em 2016 está estimada em 49,67 milhões de sacas – RSS**. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/12830496/producao-brasileira-de-cafe-em-2016-esta-estimada-em-4967-milhoes-de-sacas>.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Seis maiores estados produtores dos Cafés do Brasil atingiram 98% do volume da safra de 2017. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31081641/seis-maiores-estados-produtores-dos-cafes-do-brasil-atingiram-98-do-volume-da-safra-de-2017>. Acesso:04/08/2018.B

EMPINOTTI, V.; JACOBI, P. R. Pegada hídrica: inovação, corresponsabilização e os desafios de sua aplicação. **São Paulo: Annablume**, 2012.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World water. Day: irrigation could help fithier hunger and** . acesso: www.fao.org. 2002.

FERNANDES, D. S. et al. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Embrapa Arroz e Feijão, 2010.

GIACOMIN, G. S.; JÚNIOR, A. Akira O.; **A pegada hídrica como instrumento de conscientização ambiental**. Monografias Ambientais, v. 7, n. 7, p. 1517-1526, 2012.

GWENZI, Willis et al. Comparative short-term effects of sewage sludge and its biochar on soil properties, maize growth and uptake of nutrients on a tropical clay soil in Zimbabwe. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 15, n. 6, p. 1395-1406, 2016

HERATH, H. M. S. K.; CAMPS-ARBESTAIN, MARTA; HEDLEY, MIKE. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol. **Geoderma**, v. 209, p. 188-197, 2013.

HOEKSTRA, A. Y. et al. **Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability**. PLoS One, v. 7, n. 2, p. e32688, 2012.

HOEKSTRA, A. Y. et al. Manual de Avaliação da pegada Hídrica. **Estabelecendo o Padrão Global**. Earthscan, 2011.

IRRIGAÇÃO.NET - **Cafeicultores constroem imensos reservatórios de água para garantir irrigação**. SITE: https://www.irrigacao.net/outras_noticias/cafeicultores-constroem-imensos-reservatorios-de-agua-para-garantir-irrigacao/ ACESSO: 04/01/2018.

ISLABÃO, GLÁUCIA OLIVEIRA et al. Hydro-Physical Properties of a Typic Hapludult under the Effect of Rice Husk Ash. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

JUNIOR, O. A.; **Água e agronegócio: uma relação a ser mais bem examinada**. Le Monde Diplomatique (junho, 2017). <http://diplomatique.org.br/agua-e-agronegocio-uma-relacao-a-ser-mais-bem-examinada/>. acesso: 08/07/2017

JUNIOR, VITAL CAETANO BARBOSA; DE MELO ALMEIDA, DÉBORA; DO PRADO COSTA, MALCON. Analise da emergência de *Sapindus saponaria* L. em Biochar. 2017.

KIRCHMANN, H., BORJESSON, G., KATTERER, T., COHEN, Y. **From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook**, v. 46, p. 143-154, 2017.

KITAMURA, A. E. et al. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, 2008.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 21-29, 2015.

LEHMANN, J. Persistence of biochar in soil. In: Lehmann, J. e Joseph, S. Biochar for Environmental Management. **Science and technology**. 2 ed. New York: Earthscan, 2015, 928p.

LI, XIAOPENG; CHANG, SCOTT X.; SALIFU, K. Francis. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. **Environmental reviews**, v. 22, n. 1, p. 41-50, 2013.

LIU, Zuolin et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **Plos one**, v. 12, n. 6, p. e0179079, 2017.

LOBO, T. F. et al. Manejo do lodo de esgoto e nitrogênio mineral na fertilidade do solo ao longo do tempo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2705, 2013.

LOPES, H. M. **Caracterização química e física de biocarvão de lodo de esgoto sob diferentes temperaturas de pirólise**. 2014.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – **CAFÉ NO BRASIL** - <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira> , ACESSO EM: 05/01/2018.

MARACAJÁ, K. F. B. et al. Pegada Hídrica como Indicador de Sustentabilidade Ambiental. **REVISTA REUNIR**, v. 2, n. 2, p. 113-125, 2012.

MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia**, v. 66, n. 2, 2007.

MARTINEZ, D. G. USO DE BIOSSÓLIDO NA AGRICULTURA. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 3, 2015.

MARTINS, Cristiani Campos et al. Crescimento inicial do café Conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner) sob diferentes lâminas de irrigação. **Engenharia na Agricultura**, v. 14, n. 3, p. 193-201, 2006.

MARTINS, Cristiani Campos; Antônio Alves Soares, Camilo Busato, Edvaldo Fialho dos Reis. MANEJO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO NO CAFEIEIRO (*COFFEA ARABICA* L.). **Bioscience Journal**, v. 23, n. 2, 2007.

MARTINS, D. M. F. et al. **Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 10, p. 1054-1061, 2011.

MARTINS, D. R. et al. Estado nutricional de cafeeiros comerciais após aplicações de lodo de esgoto como condicionador do solo. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 248-256, 2015.

MELLO, C. B. S.; BARROS E. C.; NASCIMENTO, L. A. F.; MONTERO, C. J. E. Sistema de irrigação controlado por umidade do solo **ELETRÔNICA I**, 13 de Julho, 2017.

MELO, W J; MARQUES, M. O. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: **EMBRAPA Meio Ambiente**, v. 312, 2000.

MIOLA, E. C. C. et al. Intervalo hídrico ótimo em solo construído após mineração de carvão em diferentes limites críticos de resistência à penetração e umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, 2015.

MONTEIRO, H. C. F. et al. Dinâmica de Decomposição e Mineralização de Nitrogênio em Função da Qualidade de Resíduos de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras1. **R. Bras. Zootec**, v. 31, n. 3, p. 1092-1102, 2002.

NETO, G. M. B. et al., **PEGADA HÍDRICA: UM INDICADOR DE SUSTENTABILIDADE DA ÁGUA**. 2014.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Water and food security** http://www.un.org/waterforlifedecade/food_security.shtml, Acesso: 04/01/2018.

PACHECO, EDSON PATTO; CANTALICE, JOSÉ RAMON BARROS. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 403-415, 2011.

PAIVA, LEANDRO CARLOS; GUIMARÃES, RUBENS JOSÉ; SOUZA, CARLOS ALBERTO SPAGGIARI. Influência de diferentes níveis de sombreamento sobre o crescimento de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciência e agrotecnologia**, v. 27, n. 1, p. 134-140, 2003.

PAZ, V. P. S.; FRANCO, T. R. E.; MENDONÇA, F. C., **Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente**. 2000.

PETTER, F. A. et al. Biocarvão no solo: aspectos agronômicos e ambientais. In: **Embrapa Florestas-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL., 8.; INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE AGRICULTURE, 5. Sinop. Ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento sustentável das novas fronteiras agrícolas: anais.[Sinop: SIMBRAS], 2016.

PRIMO, J. T. A. et al. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. *Ceres*, v. 62, n. 1, 2015.

RABELO, R. R. et al. **A cadeia produtiva orizícola do Baixo São Francisco: antecedentes, situação atual, perspectivas e atuação de alguns componentes**. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Folderes/Folhetos/Cartilhas (INFOTECA-E), 2013.

RAMOS, F. T. et al. Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um neossolo quartzarênico cultivado com caju. *Bioscience Journal*, v. 30, n. 6, 2014.

SANTOS, JOSÉ DO NASCIMENTO; PEREIRA, EDILÉA DUTRA. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. **Cadernos de Pesquisa**, 2013.

SCALCO, M. S., COLOMBO, A., MENDES, R. D. B., CARVALHO, E. M., GUIMARÃES, R. J., & OLIVEIRA, P. M. D., **Consumo de água para cafeeiros irrigados por gotejamento sob diferentes sistemas de plantio**. 2007.

SERAFIM, Milson E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 4, 2013.

SERGIPE. SRH - Superintendência de Recursos Hídricos. **Atlas digital sobre os Recursos Hídricos de Sergipe**. ARACAJU: SEPLANTEC-SRH, CD-ROM. 2012.

SIGNOR, Diana; DEON, M. D. Influência do biocarvão na retenção de água em argissolo e vertissolo. In: **Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., 2017, Juazeiro, BA. A agrometeorologia na solução de problemas multiescala: anais. Petrolina: Embrapa Semiárido; Juazeiro: UNIVASF; Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2017.

SILVA, AP da; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 6, p. 1775-1781, 1994..

SILVA, C. R. et al. Calibração da sonda de capacitância Diviner 2000® em um Argissolo. In: **XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, João Pessoa-PB, Resumos Expandidos**. 2006.

SILVA, G. G. C .et al. **USO DO BIOCHAR PARA FINS AGRÍCOLAS: Principais vantagens**. 2017.

SILVA, M. A. S. da et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciencia Rural**. Santa Maria. vol. 35, n. 3 (mai./jun. 2005), p. 544-552, 2005

SILVA, Mellissa Ananias Soler da et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciencia Rural**. Santa Maria. vol. 35, n. 3 (mai./jun. 2005), p. 544-552, 2005

SILVA, T. L. et al. Intervalo hídrico ótimo utilizado como indicador da qualidade física em perímetro irrigado. **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, n. 4, 2016.

SILVA, T.L. **Efeito do uso do solo nos atributos físicos e químicos nos lotes do perímetro irrigado Piauí, município de Lagarto-SE**. 2011. 71 p. . Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas). Universidade federal de Sergipe. São Cristovão, 2011.

SILVA, V. P. R. et al., Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 1, 2013.

SILVA, V. P. R.; TAVARES, A. L.; SOUSA, I. F. 2013. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo simples e dual do coentro. 255-259. **Hortic. bras.**, v. 31, n. 2, abr. - jun. 2013.

SOUSA, A. A. T. C. de et al. Biochar de lodo de esgoto: efeitos no desenvolvimento agrônomo do rabanete. **Cadernos de Agroecologia**, v. 10, n. 3, 2015.

SOUSA, A.A.T.C. - SOUSA, ALEX ANTÔNIO TORRES CORTÊS DE. “BIOCHAR DE LODO DE ESGOTO: EFEITOS NO SOLO E NA PLANTA NO CULTIVO DE RABANETE” Orientação: Cícero Célio de Figueiredo, Brasília, 2015.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.63-68, 2002.

STOLF, Rubismar et al. Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 3, 2014.

SUN, Fangfang; LU, Shenggao. Biochars improve aggregate stability, water retention, and pore-space properties of clayey soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 1, p. 26-33, 2014.

TAVARES FILHO, João. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 27, n. 4, 2006.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E.; CARDOSO, J. L. O PARADOXO DA IRRIGAÇÃO: PRODUZIR ALIMENTOS SEM CONSUMIR ÁGUA. **XII Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem – CONIRD**. 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. e COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico em sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORRES DE ARAÚJO PRIMO, Jorge et al. Calibração de sondas capacitivas, funções físico-hídricas e variação do armazenamento de água em um argissolo cultivado com palma forrageira. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, 2015.

ULYETT, J.; Sakrabani, R.; Kibblewhite, M., & Hann, M. **Impact of biochar addition on water retention, nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils**. *European Journal of Soil Science*, v. 65, p. 96–104, 2014.

UNESCO - Fatos e dados RELATÓRIO MUNDIAL DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE. O DESENVOLVIMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS 4 **O manejo dos recursos hídricos em condições de incerteza e risco.** 2012.

USMAN, K., KHAN, S., GHULAM. S., KHAN, M.U., KHAN, N., KHAN, A.M., KHALIL, S.K. Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications. *American Journal of Plant Sciences*, V.3, P. 1708-1721, 2012.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society**. v. 44, p. 892-898, 1980.

WEISS, C.; SANTOS, M. **A agricultura contemporânea e os novos desafios.**

YU, O. Y. et al. Characterization of biochar and its effects on the water holding capacity of loamy sand soil: Comparison of hemlock biochar and switchblade grass biochar characteristics. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 36, n. 5, p. 1474-1479, 2017.

HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, M.R. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:1264-1270, 1985.

SORT, X., ALCANIZ, J.M. Effects of sewage sludge amendment on soil aggregation. *Land Degradation & Development*, Oxford, v.10, n.1, p.3-12, 1999